



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

Facoltà di ingegneria

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle
Costruzioni

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Tesi di laurea

**Analisi metodologica dei processi di cartiera ed implementazione delle
BAT.**

Candidato:

Matteo Puccini

Relatori:

Prof. Ing. Alessandro Franco

Paolo Peruzzi

Anno accademico 2015/2016

Introduzione ed obiettivi del lavoro svolto.	6
1. Introduzione al processo cartario.	8
1.1 Premessa.....	8
1.2 Il processo di produzione della carta.	10
1.3 La nascita e le caratteristiche della carta.	13
1.3.1 Cellulosa.....	14
1.3.2 Emicellulosa	15
1.3.3 Lignina.....	16
1.4 Estrazione della cellulosa.....	18
1.4.1 Estrazione chimica.....	18
1.4.1.1 Processo Kraft (o al solfato).....	18
1.4.1.2 Processo al solfito.....	19
1.4.2 Estrazione meccanica	20
2. Descrizione delle sottofasi del processo e relativi flussi energetici e materiali.	22
2.1 Premessa.....	22
2.2 Preparazione impasti.....	23
2.2.1 Spappolamento.	23
2.2.2 Epurazione.	24
2.2.3 Miscelazione.	26
2.2.4 Raffinazione.	26
2.2.4.1 Il legame ad idrogeno.	27
2.3 Macchina continua.	28
2.3.1 Testa macchina.....	28
2.3.2 Formazione.	29
2.3.3 Pressatura.	31
2.3.4 Seccheria.....	32
2.4 Lavorazioni finali.	35
2.5 Trattamento acque.....	35
3. Tecnologie e variabili di processo: approfondimento per ogni singola sottofase, materia prima utilizzata, tipologia di prodotto finito.	37
3.1 Analisi delle variabili tecnologiche per sottofase.	37
3.2 BAT.	49

4. Impianti di generazione termica ed elettrica: analisi delle possibili combinazioni per la generazione termica ed elettrica e loro valutazione nell’ottica di implementazione delle BAT.	55
4.1 Premessa.....	55
4.2 Impianti di generazione.	59
4.3 Soluzione 1: impiego di un gruppo turbogas e di un generatore di vapore funzionanti separatamente.....	60
4.4 Soluzione 2: generatore di vapore e turbina a contropressione.	62
4.5 Soluzione 3: generatore di vapore e turbina con spillamento di vapore.....	65
4.6 Soluzione 4: turbogas con generatore di vapore a recupero.	67
4.7 Soluzione 5: turbogas, generatore di vapore a recupero e turbina a vapore.	71
4.7 Soluzione 6: motore a combustione interna con generatore di vapore a recupero.	75
4.8 Riepilogo.	78
5. Un esempio concreto di evoluzione degli impianti cogenerativi: lo stabilimento Lucart S.p.A. di Castelnuovo di Garfagnana.	81
5.1 Breve descrizione del processo produttivo.	81
5.1.1 Ingresso materia prima.....	81
5.1.2 Spappolamento della cellulosa.	81
5.1.3 Stoccaggio impasto.....	82
5.1.5 Miscelazione (tine di miscela e tine di macchina).	82
5.1.6 Raffinazione.	83
5.1.7 Seconda e terza fase di epurazione dell’impasto.	83
5.1.8 Formazione del foglio.	84
5.1.9 Cassa di afflusso.	84
5.1.10 Formazione “crescent former” – tela e feltro.	85
5.1.11 Asciugamento del foglio.	85
5.1.12 Presse aspirante e fori ciechi.	85
5.1.13 Monolucido e cappe ad alta efficienza.....	86
5.1.14 Allestimento bobine tissue.	86
5.1.15 Produzione prodotto finito – Converting.	86
5.1.16 Stoccaggio e spedizione bobine tissue e prodotto finito.	87
5.1.17 Stoccaggio prodotto finito non conforme.	87
5.2 Sistemi di generazione e servizi ausiliari.	87
6. Integrazioni e ottimizzazioni di processo.	91

7. Conclusioni.....	104
Bibliografia:.....	106

Introduzione ed obiettivi del lavoro svolto.

Il settore cartario, per la natura intrinseca delle lavorazioni che lo caratterizzano, presenta una stretta connessione con le problematiche connesse alla produzione e gestione dei flussi di energia. Si stima infatti che circa il 30% dei costi di produzione di uno stabilimento riguardano l'approvvigionamento della stessa, collocando il tipo di attività manifatturiera oggetto di analisi solo poco al di sotto di altri settori tradizionalmente considerati come molto energivori (siderurgico, petrolchimico ecc.). Ciò è legato innanzitutto al notevole consumo di energia elettrica (movimentazione, spappolamento ecc.) e termica (seccheria, asciugatura, ecc.), questa ultima sotto forma di vapore di processo, acqua calda o aria calda.

Il settore è quindi stato sempre molto interessato a cercare di rendere quanto più possibile efficiente il processo da un punto di vista energetico, nel tentativo di abbattere tali oneri a fini di competitività.

Questo fattore ha stimolato negli anni lo studio sull'ottimizzazione dei processi e degli impianti di supporto, permettendo il raggiungimento di livelli di avanguardia. Ciò è testimoniato dallo sviluppo nel tempo di tecnologie sempre più efficienti che hanno evoluto gli impianti che hanno visto come uno dei settori che prima di altri ha fatto ricorso a metodologie sistematiche di efficientamento, come ad esempio testimonia l'installazione di numerosi impianti di tipo cogenerativo.

Tuttavia, anche in aree in cui si ha una fitta presenza di realtà simili, accumulate da medesimi meccanismi produttivi e differenti solo per volumi prodotti e tipologie di prodotto è spesso mancato un inquadramento generale di settore che superi la specificità delle singole cartiere.

In un quadro variegato del genere, l'obiettivo di questo lavoro è stato in primo luogo quello di arrivare ad avere una visione generale del comparto cartario che rifletta lo stato dell'arte raggiunto, sia a livello di usi energetici per i processi produttivi, sia il livello di avanzamento tecnologico che ha riguardato i vari processi di stabilimento con particolare attenzione a quelli che riguardano la produzione dell'energia da utilizzare per i processi. In secondo luogo, si sono esaminate possibili soluzioni di ottimizzazione al fine di implementare le BAT (Best Available Technologies) e di suggerire eventuali ulteriori strategie di ottimizzazione.

A livello impiantistico l'attuale ottimo tecnologico è rappresentato dall'impiego della cogenerazione. Essa è per definizione la generazione simultanea di energia elettrica e termica, rappresentando la naturale evoluzione della produzione separata. La necessità di entrambe le tipologie di energia nello stesso sito e le caratteristiche intrinseche di alcune macchine, che con il loro normale funzionamento rilasciano in uscita un flusso ad alto contenuto entalpico, hanno permesso lo sviluppo di questi sistemi. L'idea è appunto quella di recuperare energia da un processo di produzione principale mediante un processo secondario sottoposto che permetta un risparmio di combustibile dovuto alla limitazione delle perdite. A livello normativo, il rispetto di particolari requisiti di consumo consente di beneficiare di incentivi e agevolazioni. Le modalità con cui viene realizzata la produzione congiunta di energia elettrica e termica sono diverse, alla base

c'è l'impiego di un gruppo turbogas, di una turbina a vapore o di un motore a combustione interna alternativo. Il primo, che produce energia elettrica tramite l'espansione di fumi ad alta temperatura e pressione in una turbina a gas, consente il recupero del calore del flusso gassoso in uscita da essa con un generatore di vapore a recupero. Nel secondo caso, dopo aver prodotto vapore (anch'esso ad alta temperatura e pressione) in una caldaia, si fa espandere in una turbina a per ottenere lavoro meccanico convertibile in elettricità. Si recupera poi lo stesso vapore a scopi termici, secondo due modalità: o fermando l'espansione alle condizioni volute (contropressione), o prelevandone la quantità desiderata nel corso dell'espansione (spillamento). Con i motori alternativi a combustione interna si opera raccogliendo il lavoro meccanico all'albero da tramutare in elettricità, si recupera calore dai fumi con un generatore di vapore a recupero e dal fluido di raffreddamento del motore con uno scambiatore di calore. Tutte queste casistiche base sono soggette ad articolazioni più o meno complesse.

Il lavoro è articolato come segue. Dopo una parte introduttiva sul mondo della carta (capitolo 1), che riporta alcune statistiche sulla produzione mondiale ed europea tratte dalla pubblicazione redatta da Assocarta *“L'industria cartaria nel 2013”* [1], si sono descritti i processi che avvengono all'interno di uno stabilimento scendendo nel dettaglio delle varie sottofasi, analizzando i flussi energetici e materiali che le caratterizzano (capitolo 2). Nel capitolo successivo (capitolo 3) si sono invece passate in rassegna le variabili tecnologiche applicabili ad ogni sottofase e si è riportata una lista di BAT pubblicata sempre da Assocarta nelle *“Linee Guida per la conduzione della diagnosi energetica nel settore cartario”*, [2].

In seguito l'attenzione è stata spostata sugli impianti di produzione dell'energia: prendendo come modello tre ipotetici stabilimenti con differenti taglie di consumo, si sono proposte alcune soluzioni impiantistiche da affiancarci, valutando i consumi di combustibile e ricavando alcuni parametri di confronto tra le varie alternative. Per la stima dei consumi delle tre cartiere modello si è fatto riferimento ai dati di origine statistica riportati nel *“BRef (Best Available Techniques Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board)”* [3] del settore cartario (capitolo 4). Si è riportato quindi un esempio concreto di evoluzione della configurazione impiantistica nella cartiera Lucart S.p.A. di Castelnuovo di Garfagnana (capitolo 5), per poi proporre soluzioni di processo ottimizzato in relazione a quanto emerso dall'analisi sulle modalità di approvvigionamento energetico (capitolo 6). Seguono alcune considerazioni conclusive che in maniera sintetica richiamano i principali risultati dell'analisi svolta nel lavoro.

1. Introduzione al processo cartario.

1.1 Premessa.

L'industria cartaria a livello nazionale rappresenta uno dei settori più produttivi, che colloca l'Italia tra i primi posti a livello europeo per questo specifico settore merceologico. Da un punto di vista mondiale è possibile osservare un progressivo avanzamento dell'Asia (trainata dalla Cina) riguardo ai volumi di carta messi in commercio, a discapito di Europa e Nord America, che rappresentano con l'area geografica sopracitata i maggiori produttori.

Grafico 1 - Evoluzione della produzione cartaria nei principali paesi/aree [milioni di tonnellate]

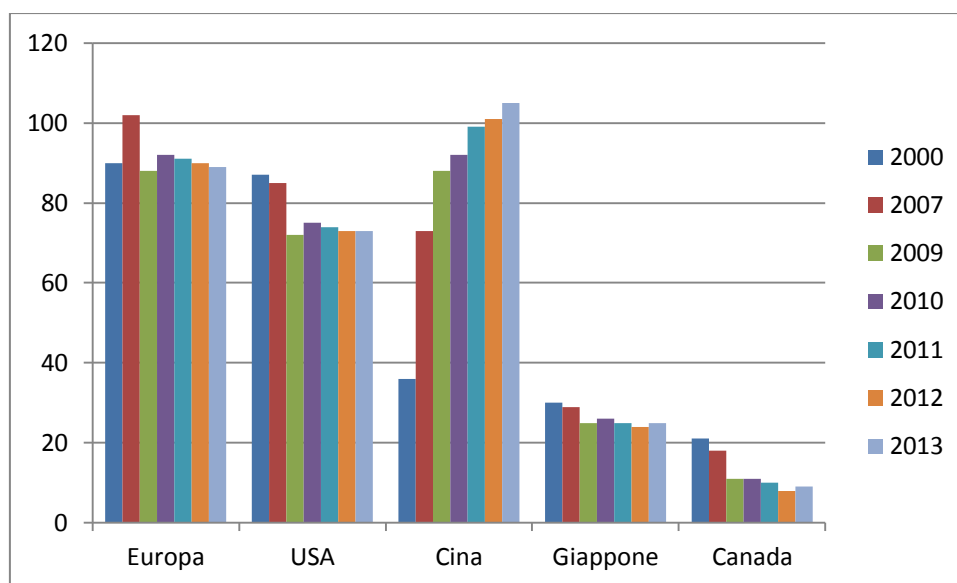


Grafico 2 - Produzione mondiale di carte e cartoni

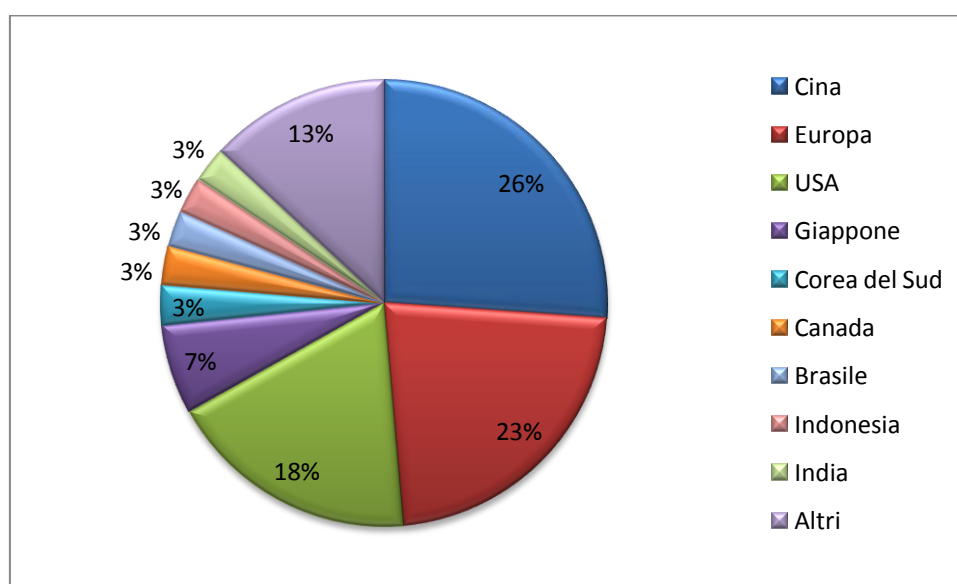


Grafico 3 - Produzione europea di carte e cartoni

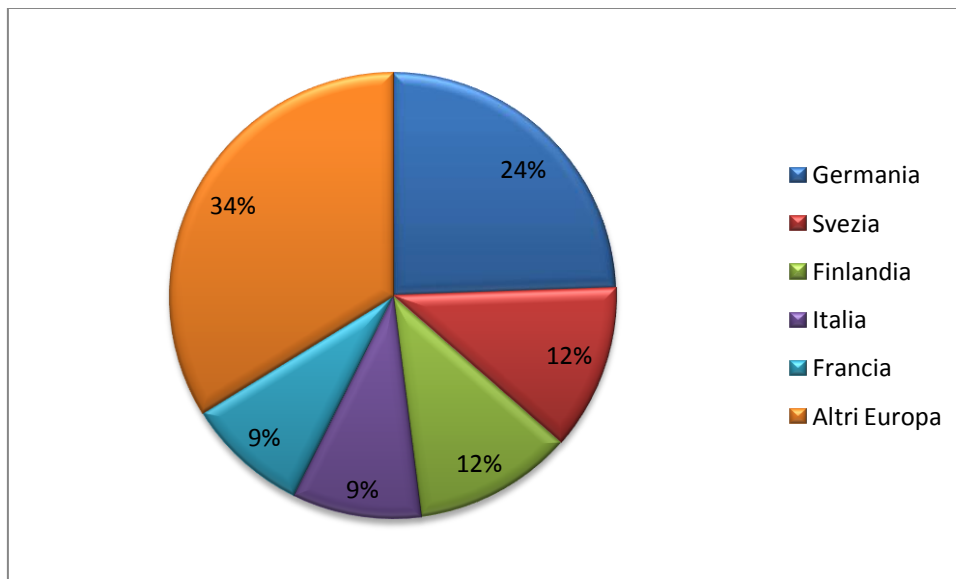


Grafico 4 - Produzione mondiale per grandi aree di carte e cartoni nel 2007

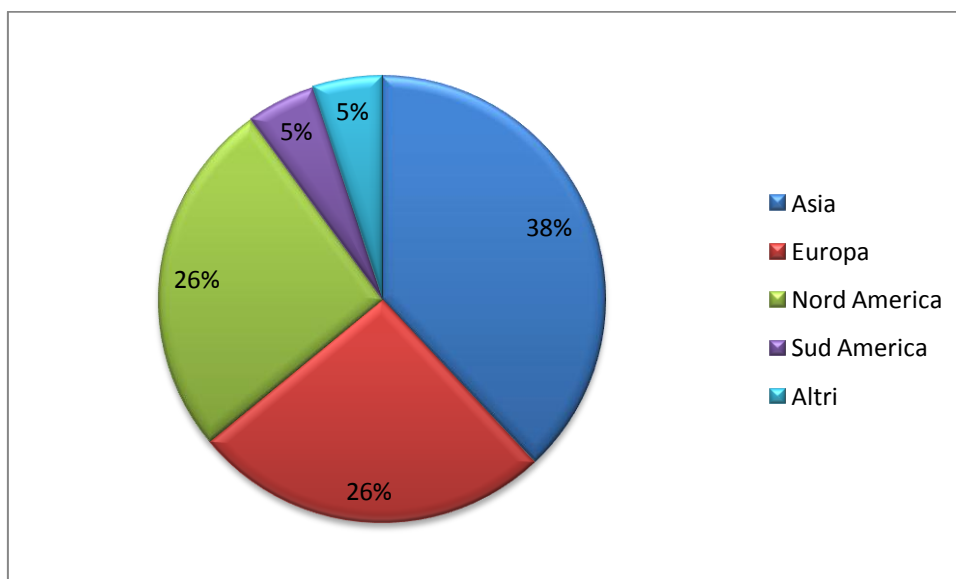
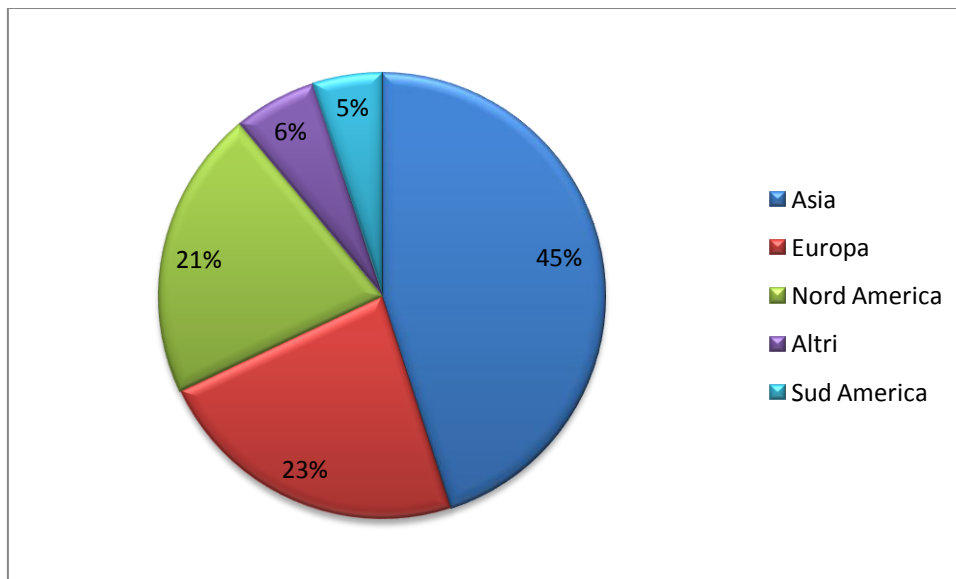


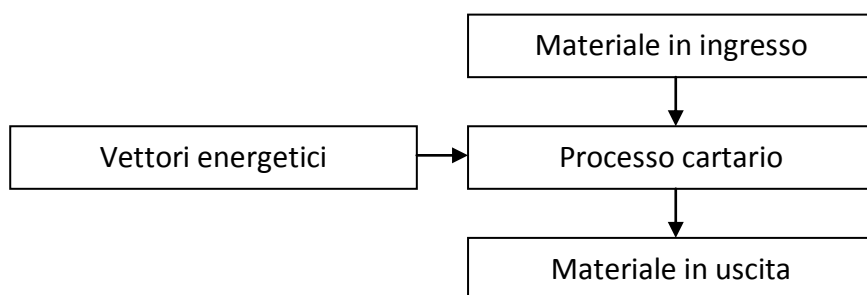
Grafico 5 - Produzione mondiale per grandi aree di carte e cartoni nel 2012



Stretta è la connessione tra questo settore e quello energivoro, l'attività cartaria costituisce infatti una parte consistente in termini di consumo di energia elettrica e termica. Ai fini della ricerca delle migliori tecnologie disponibili (Best Available Technologies) per ottenere vantaggi nella gestione dell'economia di un impianto, riveste grande importanza lo studio del miglior metodo di approvvigionamento di energia, compatibile con le esigenze del particolare processo asservito. La ricerca nel settore è rivolta quindi sia al progresso nell'ambito dei componenti delle linee produttive, sia al progresso riguardante i servizi ausiliari. La vastità del campo dei prodotti cartari implica una grande varietà di modelli di consumo a seconda della tipologia che si prende in esame: carta tissue anziché cartoncino o carta grafica, cellulosa anziché carta riciclata come materia prima, comportano consumi differenti sia di elettricità che di energia termica. Da un punto di vista energetico la situazione impiantistica più conveniente non è detto che sia sempre rappresentata da quella con il rendimento migliore, risulta interessante a riguardo mettere a confronto diverse configurazioni per uno stesso stabilimento. Ad oggi nel panorama dei sistemi di generazione possiamo trovare molteplici possibilità, dalle più elementari costituite da componenti separati per l'energia termica e quella elettrica, fino alla cogenerazione, a sua volta realizzabile con differenti macchine. La scelta di una configurazione o di un'altra, come già accennato, da un punto di vista ingegneristico dovrebbe considerare oltre al rendimento, anche fattori come la modulabilità e la capacità di adattarsi a cambiamenti del processo (variazioni del volume di produzione, sostituzione di macchinari, aggiunta di ulteriori lavorazioni).

1.2 Il processo di produzione della carta.

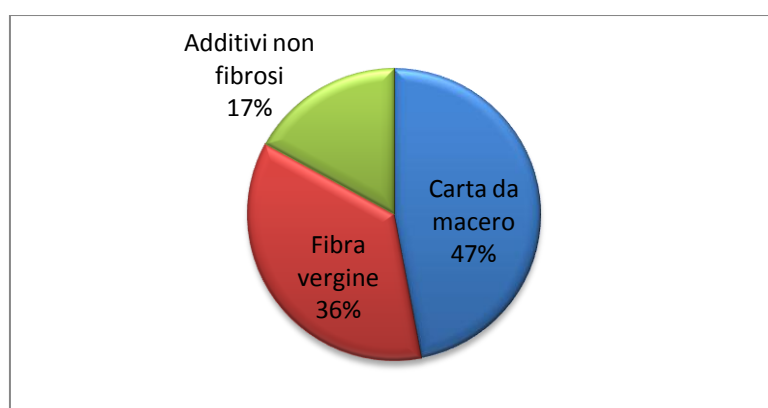
Tra gli obiettivi di questo lavoro, come già detto, c'è quello di fornire una descrizione generale dei processi di cartiera (il termine generale è usato per sottolineare il fatto che ogni cartiera è una realtà a se stante), un'analisi dei flussi energetici coinvolti nelle varie sottofasce del processo generale e uno studio delle modalità di auto-approvvigionamento di energia termica ed elettrica. La realtà cartiera è schematizzabile nel seguente modo:



Ciascun blocco del grafico può a sua volta essere sviluppato con maggior dettaglio. In primo luogo riguardo al materiale in ingresso, che, come già accennato e come vedremo in seguito, può essere rappresentato da carta da macero o da fibra vergine. Politiche dettate da motivazioni economiche ed ecologiche spingono verso il sempre maggior utilizzo della fibra riciclata, specialmente in Italia, luogo povero di risorse forestali adeguate a sostenere l'utilizzo di quella vergine.

Materiale in ingresso
Fibra vergine
Carta da macero
Additivi non fibrosi

Grafico 6 - Materie prime nell'industria cartaria



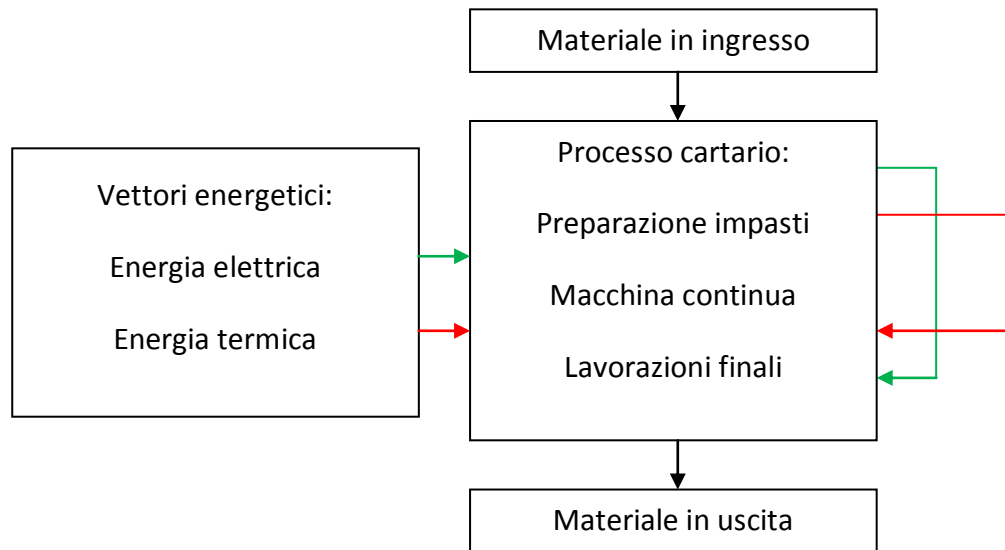
Tutto questo compatibilmente con il prodotto desiderato, va considerato infatti il progressivo degrado di una fibra sottoposta a continui riciclaggi. Gli additivi non fibrosi racchiudono l'acqua, elemento indispensabile dal punto di vista chimico e fisico per la conduzione del processo, più le cariche minerali necessarie per l'ottenimento di specifiche caratteristiche.

In uscita il panorama è assai più vasto:

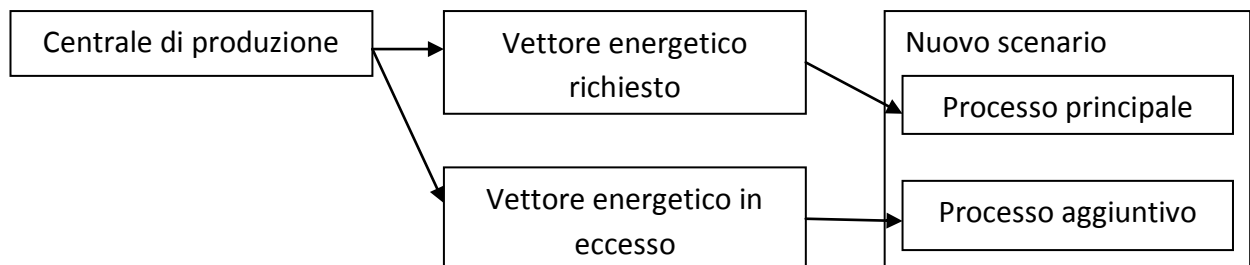
Materiale in uscita	
Carta da stampa	Carta per giornali e guide telefoniche
	Carta per offset
	Carta per rotocalco
	Carta per roto-offset
	Carte speciali (carte geografiche, carta moneta)

	e per assegni)
Carte da scrivere e per ufficio	Carta da scrivere
	Carta per buste
	Carta per quaderni
	Carta per disegno
	Carta per fotocopie
	Carta per fax
	Carta da diazotipia
	Carta carbone e autocopiante
Carte da imballaggio	Carta kraft, crespata e per sacchetti
	Carta per alimenti
	Carta pergamena vegetale
	Carta uso pergamena
	Carta pergamino
	Carte catramate, siliconate, accoppiate con plastica
Carte e cartoncini	Cartoni ad un getto
	Cartoni a più strati
	Cartoni ondulati
	Carta da onda
	Cartoni pressati
	Cartonlegno
	Cartoncini
Articoli igienico/sanitari (tissue)	Carta igienica
	Fazzoletti
	Tovaglioli e tovaglie
	Asciugamani
	Carte per uso medico
Carte per uso industriale e varie	Carta per cavi elettrici, condensatori, etc.
	Carta per laminato plastico
	Carta per sigarette
	Carta per fotografia
	Carta da filtro
	Carta adesiva
	Carta decorativa
	Carta da parati

Il processo cartario e i vettori energetici come vedremo sono i due blocchi a cui verrà dedicata la maggior attenzione, e che risultano i più articolabili in più sottoschemi.



Lo studio della parte rappresentata dal blocco a sinistra del grafico riportato sopra permette di perseguire l'obiettivo dell'ottimizzazione impiantistica. A conclusione del tutto si riportano considerazioni sulle soluzioni più convenienti e spunti di riflessione su come integrare tra loro processi principali e secondari, al fine di sfruttare al massimo eventuali flussi residui e fornire indicazioni per l'implementazione delle BAT (Best Available Technologies).



1.3 La nascita e le caratteristiche della carta.

Risalgono a quattro millenni prima della nascita di Cristo le tracce di scrittura, ma inizialmente vennero utilizzati dall'uomo materiali come pietra, legno, argilla, immediati e facili da reperire in natura. Con la progressiva diffusione dell'uso comune a molte popolazioni di lasciare segni ai posteri, si è verificata un'evoluzione verso strumenti più adatti. In Egitto, intorno al 3000 a.C., venivano adoperati fogli di papiro, ricavati dall'omonima pianta. Successivamente si optò per la pergamena, ottenuta da pelli animali opportunamente lavorate. Il processo di produzione della carta risale all'inizio del II secolo d.C. in Oriente, in Cina si fabbricavano fogli da fibre tessili e vegetali. La diffusione nel resto del mondo si ebbe in un lasso di tempo assai vasto, tra il secolo VIII e XIII raggiunse infatti l'Asia Minore e l'Europa. La materia prima era comunque di origine tessile (stracci e scarti vari). A partire dal XVII secolo furono introdotti notevoli miglioramenti tecnologici,

che accorciarono i tempi di lavorazione e semplificarono il processo generale, a partire da un sistema di macerazione che riduceva in poltiglia gli stracci, fino ad arrivare all'introduzione delle macchine continue nel corso del 1800 che permisero lo sviluppo industriale del settore. Da lì a poco si ebbe la graduale sostituzione degli stracci con il legno come materia prima, fino ad arrivare ai giorni nostri.

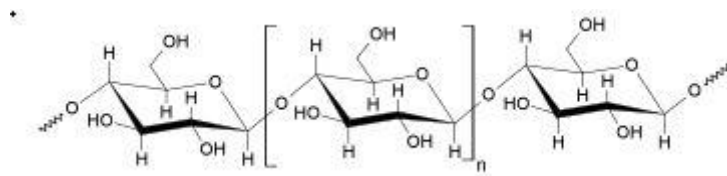
La carta è formata da un insieme di fibre di cellulosa pressate e sottoposte a vari trattamenti. Tale materia prima può essere ottenuta da piante legnose, da piante non legnose (in parte minore), da carta riciclata. Una piccola percentuale può essere recuperata anche da altri materiali, tipo scarti tessili, etc. A livello mondiale la cellulosa vergine risulta essere la più utilizzata, e qualitativamente è quella che conferisce al prodotto finale le migliori caratteristiche per l'uso. A seconda della specie vegetale di origine, si possono avere cellulose a fibra corta (latifoglie: faggi, pioppi, betulle) e cellulose a fibra lunga (conifere: pini, abeti, larici), ognuna delle quali comporta differenti lavorazioni necessarie e differenti caratteristiche del prodotto finale. Oltre a questa principale fonte di fibre, nel processo vengono utilizzate anche le sostanze di carica minerali inerti, le principali sono il carbonato di calcio, il caolino e il talco.

Qualora si utilizzino fibre vegetali di origine legnosa come materia prima, esse vengono ricavate da scarti di lavorazione o da coltivazioni ad hoc. Il tutto in accordo con politiche di sostenibilità ambientale, attente a problemi come i gas serra, etc. In Italia tuttavia il trend generale è quello di acquistare le balle di cellulosa pronte per la trasformazione, quindi la fase relativa alla loro produzione non è di particolare interesse nell'analisi energetica della realtà cartaria nazionale. Di seguito si riportano le caratteristiche delle principali sostanze che compongono le piante, e successivamente alcuni cenni sui processi di isolamento della cellulosa.

1.3.1 Cellulosa

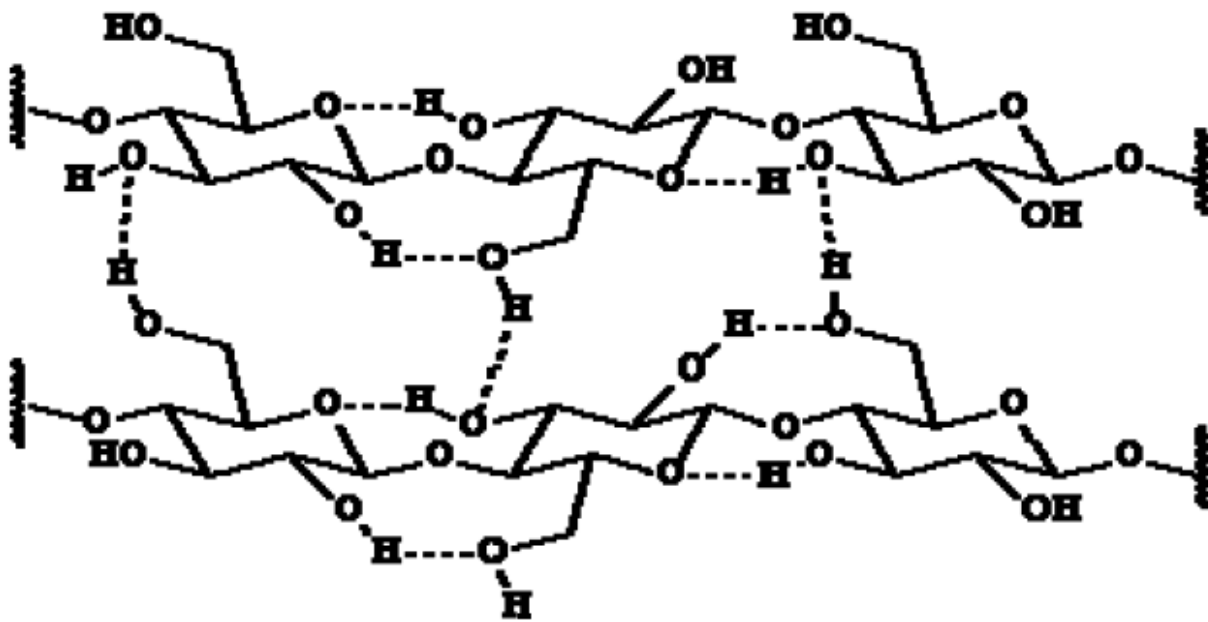
La cellulosa è un polisaccaride naturale, di formula generale $(C_6H_{10}O_5)_n$, un peso molecolare medio di 300-500 u, insolubile in acqua e forma la struttura di sostegno di tutte le biomasse sulla terra, costituendo approssimativamente il 50% del materiale della parete cellulare. Le molecole di cellulosa hanno come unità base un anello di β -D glucopiranosio. Ogni anello è ruotato di 180° rispetto al successivo pertanto l'unità ripetitiva è formata da due anelli contigui uniti a mezzo di legami 1,4- β -glicosidici.

Immagine 1 - Struttura della cellulosa



La struttura è molto stabile a causa degli anelli a sei atomi di carbonio, dall'assenza di doppi legami e dalla presenza di un sistema di ponti ad idrogeno interpolimerici.

Immagine 2 - Struttura della cellulosa

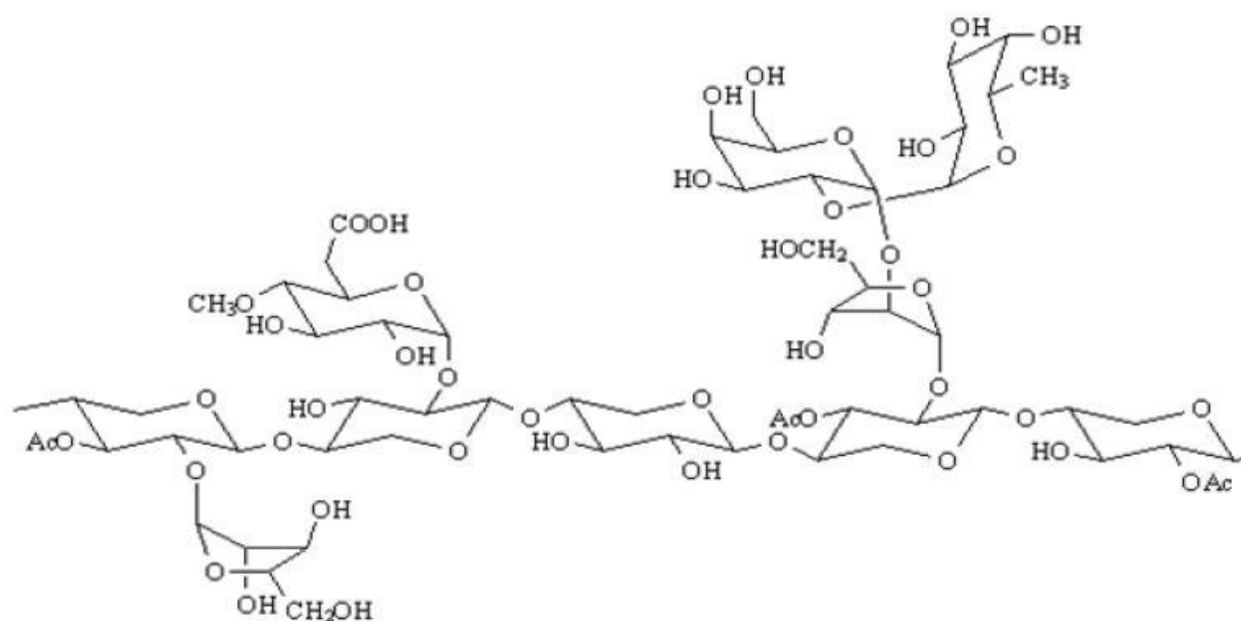


I ponti ad idrogeno sono formati da un atomo di H di un gruppo alcolico parzialmente legato ad un secondo atomo di ossigeno appartenente ad un polimero di una fibra parallela. Queste proprietà rendono il polimero cellulosa più resistente agli attacchi chimici e termici e fa sì che si sviluppi in maniera più lineare, rendendolo così oltre che resistente, anche filabile. Per questo motivo la cellulosa risulta essere la materia prima fondamentale per le fibre naturali.

1.3.2 Emicellulosa

L'emicellulosa è formata da polisaccaridi complessi che si collocano in associazione con la cellulosa nella parete cellulare. A differenza della cellulosa, l'emicellulosa è solubile in soluzioni alcaline diluite. È formata da strutture ramificate, che variano notevolmente a seconda che la biomassa sia di tipo legnoso o erbaceo. L'emicellulosa non è formata da un'identica unità monometrica ripetuta, bensì da diversi zuccheri tra i quali alcuni a cinque atomi di carbonio (xylani), altri a sei (glucani, mannani, arabinani, acidi galatturonici). Le catene sono formate di solito da 50-200 unità monometriche fra le quali, in generale, la più abbondante è lo xilano.

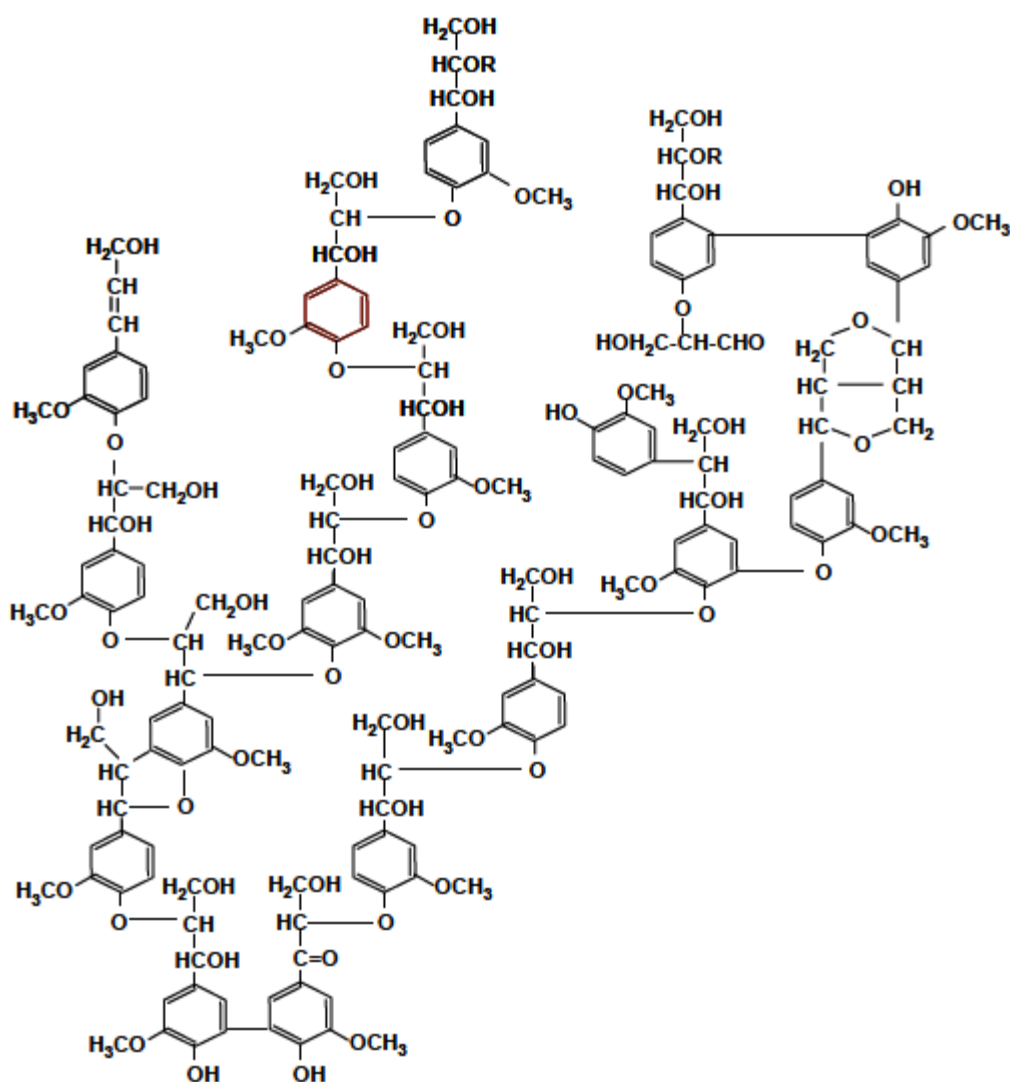
Immagine 3 - Struttura dell'emicellulosa



1.3.3 Lignina

La lignina è una molecola naturale complessa costituita da diverse unità di fenilpropano. Dopo i polisaccaridi rappresenta la struttura organica più presente nei vegetali. La presenza relativa della lignina, se da una parte si può ritenere circa costante all'interno di una stessa specie, è considerevolmente variabile tra le diverse specie. Per esempio il legno delle gimnosperme (conifere) ha un contenuto di lignina che può passare dal 27% al 37%, mentre il legno delle angiosperme, mostra mediamente un contenuto che varia dal 16% al 29%. La lignina svolge diverse funzioni fondamentali per la vita del vegetale. Il principale compito svolto dalla lignina è quello di ridurre la permeabilità all'acqua intervenendo in tutti i processi di scambio di minerali, nutrienti e metabolici. Inoltre, se la cellulosa fornisce la vera e propria resistenza meccanica caratteristica del legno, la lignina opera da riempitivo e da collante tra le cellule vegetali, fornendo resistenza alla compressione e agli urti. La lignina può considerarsi la molecola più complessa per quel che riguarda la struttura della biomassa. Non è infatti possibile dare una composizione precisa, anche se esistono diversi tentativi di fornire un modello di struttura media come nel caso della betulla, riportato in figura.

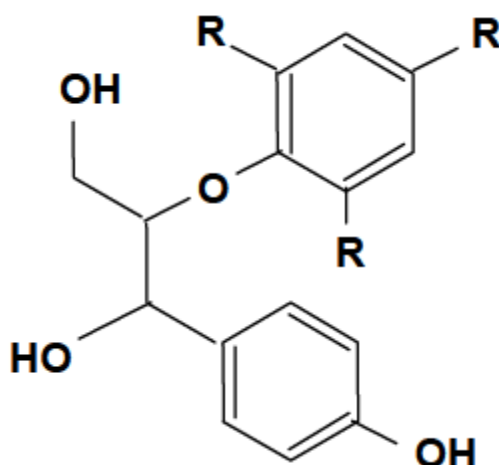
Immagine 4 - Struttura della lignina



Dal momento che le unità monomeriche di lignina presentano nella maggior parte dei casi un insieme comune di nove carboni, sei nell'anello aromatico e tre nella parte alifatica, spesso i dati analitici riguardanti le diverse lignine sono espressi rispetto alla formula C₉, come nel caso della *Picea abies* C₉H_{8.3}O_{2.7}(OCH₃)_{0.97}, o dell'*Eucalyptus regnans* C₉H_{8.7}O_{2.9}(OCH₃)_{1.58}. L'eterogeneità della lignina è ben riconoscibile per le diverse piante di diverse famiglie, ordini, generi e classi così come la struttura della lignina in una stessa specie può variare in base alla zona di provenienza ed età della pianta. In genere la lignina differisce per il diverso contenuto relativo di monomeri presenti nella struttura. Si possono individuare due grandi gruppi di piante: le softwood e le hardwood. Tra le prime si identificano principalmente le gimnosperme. Le lignine di queste piante sono caratterizzate da una maggior abbondanza di alcool coniferilico, mentre le lignine di piante hardwood, angiosperme, sono il prodotto di copolimerizzazione di alcool del siringolo, da cui dipende la maggior abbondanza di gruppi metossile (-OCH₃) sull'anello aromatico. Il contenuto tipico di metossili in una hardwood è 1,20-1,52 gruppi metossile per unità di C₉. La principale differenza tra le due classi di lignine, consiste nella maggior presenza di ossigeno nelle hardwood, ciò è strettamente correlato alla maggiore abbondanza di gruppi metossili nella struttura. Ciò si

traduce in una minore compattezza della struttura macromolecolare delle hardwood rispetto alla softwood che è in grado di formare un numero superiore di legami intramolecolari. Osservando la struttura delle lignine, è possibile notare la predominanza del legame arilglicerolo- β -aril-etere detto anche β -O-4.

Immagine 5 - Struttura della lignina



Questo legame è il principale per entrambe le classi di lignina, anche se maggiormente presente nelle hardwood.

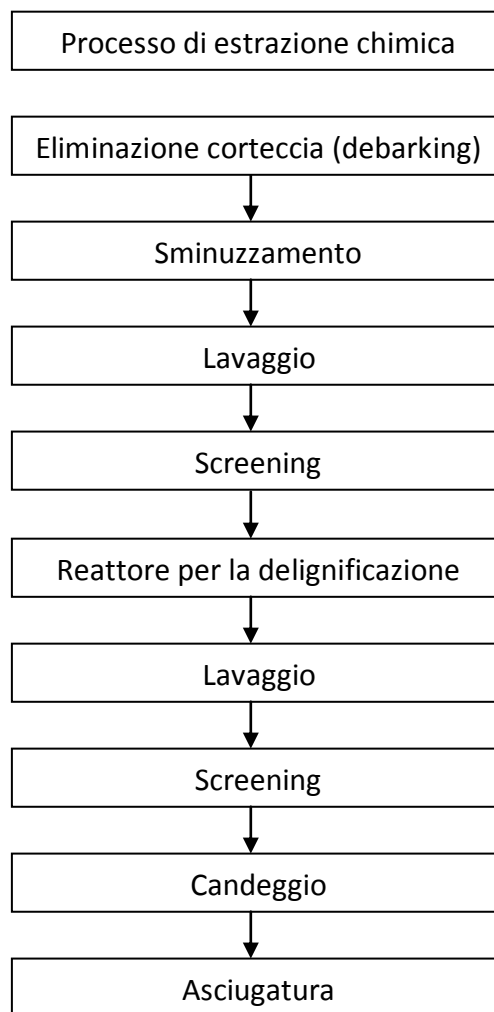
1.4 Estrazione della cellulosa

1.4.1 Estrazione chimica

1.4.1.1 Processo Kraft (o al solfato)

I processi di estrazione della cellulosa possono essere di tipo chimico o di tipo meccanico. Il processo Kraft è un metodo di estrazione chimica, detta anche al solfato per l'utilizzo di solfato di sodio nel ciclo di recupero che si affianca al principale. Il legno viene privato della corteccia, sminuzzato, investito da acqua a fini di lavaggio e, a seconda della qualità richiesta, sottoposto a screening per uniformare le dimensioni delle particelle. Successivamente, in un reattore che può essere di tipo continuo o batch, alla temperatura di circa 170°C, si ha la separazione della lignina e dell'emicellulosa dalla cellulosa, grazie all'azione dell'idrossido di sodio (NaOH) e del solfuro di sodio (Na₂S) presenti in opportune proporzioni. Nel caso discontinuo si ha solitamente un secondo stadio di delignificazione, in quello continuo si ha in particolare un pre-riscaldamento con vapore. Per la separazione delle fibre utili, dopo il reattore principale si ha una fase di lavaggio e un'altra fase di screening. La dissoluzione della lignina può essere spinta a livelli più alti tramite utilizzo di ossigeno in reattori con condizioni alcaline. Si ha quindi una sezione di candeggio, necessaria per rispondere a specifici requisiti richiesti, un terzo screening e, laddove non si abbia lo stabilimento

di cartiera integrato, un asciugamento finale. I prodotti secondari e i materiali di scarto vengono riutilizzati in cicli di supporto, per garantire elevate efficienze energetiche e produttive.

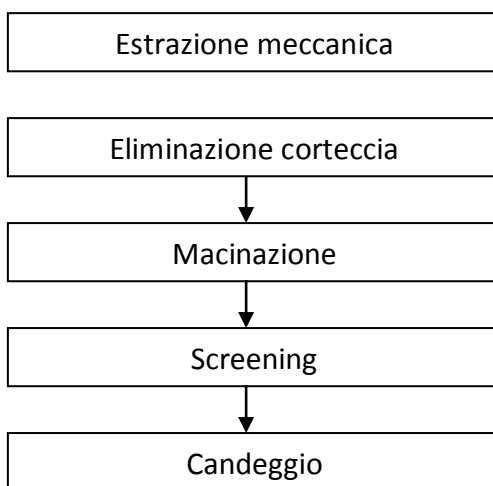


1.4.1.2 Processo al solfito

Il processo al solfito opera in maniera analoga al processo kraft, sebbene abbia un volume di produzione minore, viene comunque utilizzato per una vasta gamma di prodotti che richiedono paste legno specifiche. La sua peculiarità è quella di essere più flessibile, in quanto condotto a pH variabile, gli stadi di questo tipo di produzione sono gli stessi di quello visto in precedenza, nel reattore vengono però inseriti anidride solforosa (SO_2) e una base (NaOH , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o altro) scelta in base a considerazioni economiche o a parametri di qualità. Se il meccanismo avviene in ambiente acido si ottiene una pasta meccanicamente più debole, ma adatta a carte di elevata qualità; se il meccanismo avviene invece in ambiente neutro o alcalino, la quantità di lignina insolubile residua è elevata, richiedendo più reagenti in fase di sbianca. A seconda del pH si hanno paste adatte alla produzione di cartone, di carta per giornali, etc.

1.4.2 Estrazione meccanica

Il processo meccanico di estrazione di cellulosa, come richiamato dal nome stesso, sfrutta l'energia meccanica per rompere i legami presenti tra le fibre. Dopo le iniziali sezioni di stoccaggio ed eliminazione della corteccia troviamo quella di macinazione con l'aggiunta di acqua, parte centrale di questa filiera, analoga del reattore chimico dei processi di estrazione di tipo chimico. Il calore che si sviluppa, unito alla presenza dell'acqua favorisce la rottura dei legami tra le fibre. Una prima variante è rappresentata dalla pressurizzazione del reattore di macinazione. Anche la presenza di raffinatori comporta una più semplice dissoluzione delle fibre, l'unione di questi componenti ad un sistema di riscaldamento ausiliario fornisce il meccanismo termo-meccanico. L'ulteriore aggiunta di reagenti chimici nelle filiere viste permettono di ottenere paste di qualità migliore, avremo quindi i meccanismi meccanico-chimici e termo-meccanico-chimici. Comuni a tutte le sottotipologie viste in questo paragrafo si hanno poi lo screening ed il candeggio. La tendenza delle carte prodotte con una pasta meccanica hanno la tendenza a scolorire col tempo, pur conciliando elevate rese a buona lucentezza e resistenza.



Tipo di processo meccanico	Materia prima	Resa	Tipici usi finali della carta
Meccanico	Abete o abete rosso	95-98,5%	Carte da stampa, scrittura e per giornali
Termo-meccanico	Abete o abete rosso	93-97,5%	Carte da stampa, scrittura e per giornali
Meccanico-chimico	Abete rosso o faggio, NaOH, Na ₂ SO ₃ , H ₂ O ₂	80-90%	Carte da stampa, scrittura, tissue e cartone per imballaggi
Termo-meccanico-chimico	Abete rosso o faggio, NaOH, Na ₂ SO ₃ , H ₂ O ₂	90-94%	Carte da stampa, scrittura, tissue e cartone per imballaggi

Se la materia prima che va ad alimentare lo stabilimento di cartiera è la fibra riciclata, i trattamenti che essa deve subire sono incorporati nella fase di preparazione impasti (e che verranno descritti

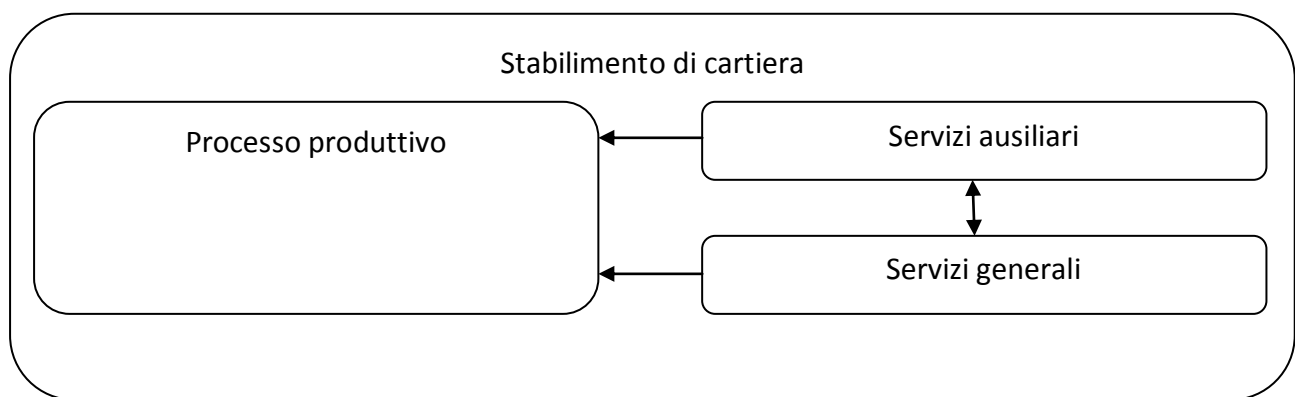
in seguito). Non trattandosi di materia legnosa, vengono a mancare le fasi di estrazione e il ciclo vitale di questo tipo di fibra è più breve.

Riferimenti: [1], [3], [13].

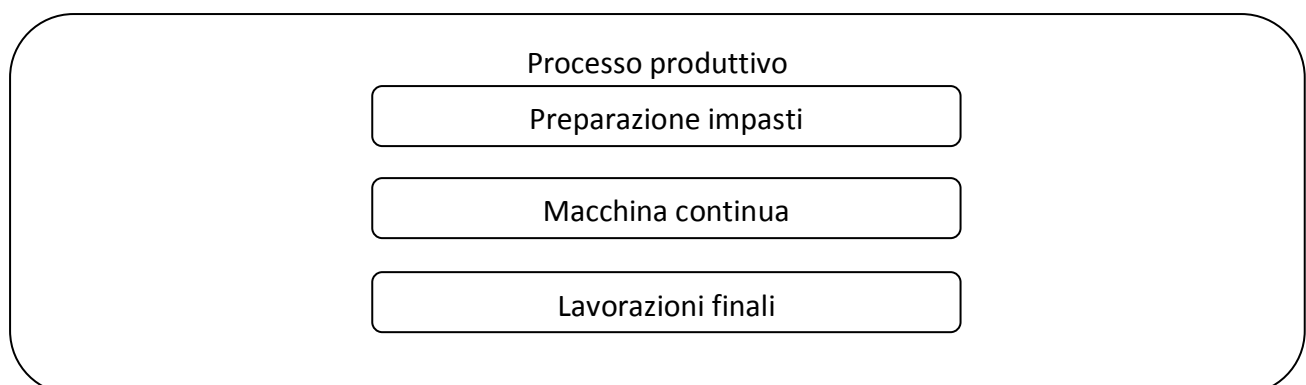
2. Descrizione delle sottofasi del processo e relativi flussi energetici e materiali.

2.1 Premessa.

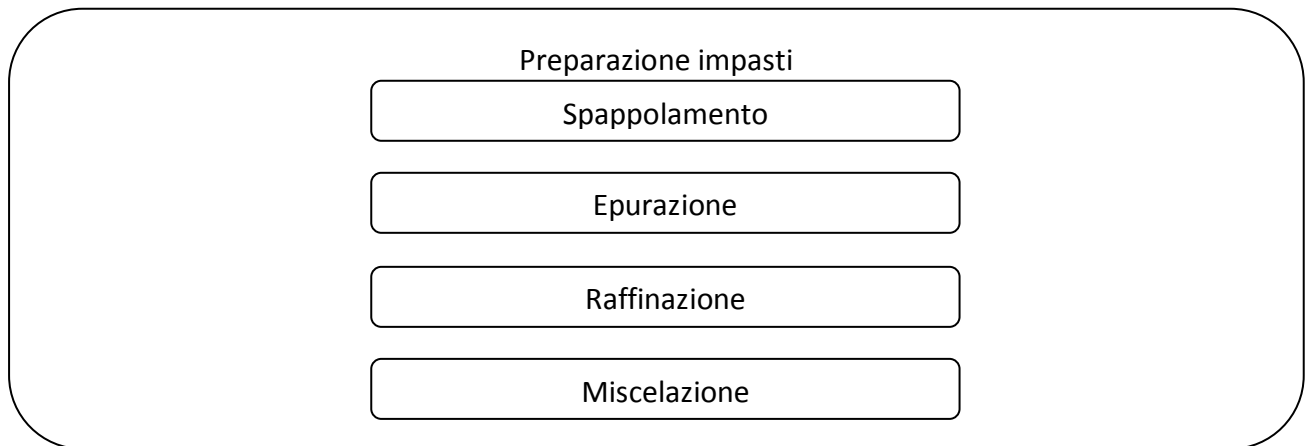
Il processo cartario, analizzato a partire dall'ingresso nello stabilimento delle materie prime (balle di cellulosa o carta riciclata), può essere suddiviso in tre macroaree principali: processo produttivo (comprendente tutti i sottoprocessi che agiscono direttamente sulle materie prime e sui vari prodotti intermedi fino a quello finale in uscita); servizi ausiliari (comprendenti tutti quei servizi di supporto alla lavorazione, senza i quali essa non potrebbe funzionare); servizi generali (comprendenti tutte quelle utenze presenti nello stabilimento che non sono direttamente correlate alla trasformazione).



Scendendo di livello, nel processo produttivo possono essere individuate le aree di preparazione impasti (la parte che comprende tutte le lavorazioni iniziali che precedono la formazione vera e propria del foglio); macchina continua (qui si ha la formazione del foglio e le successive procedure di asciugamento, pressatura, etc. come vedremo in seguito. Il nome fa riferimento alla tipologia di processo, in contrapposizione alle aree di lavoro precedenti e successive, che possono essere di tipo discontinuo (batch). Questa area rappresenta il cuore dell'intero stabilimento, ove sono localizzati gran parte dei consumi energetici.); lavorazioni finali (in questa sezione si ha la rifinitura, il prodotto viene ultimato ed è pronto per l'utilizzo o per ulteriori lavorazioni accessorie necessarie per la specificità dell'utilizzo). Per quanto riguarda la sezione dei servizi ausiliari, si hanno le centrali di produzione dell'energia termica ed elettrica, il sistema di trattamento acque, etc.



La preparazione dell'impasto da destinare alla macchina continua consta di diverse fasi principali, non necessariamente riscontrabili in tutti gli impianti come vedremo. Gli stessi singoli macchinari possono essere o non essere presenti in due cartiere diverse o configurati con una logica diversa.



2.2 Preparazione impasti.

2.2.1 Spappolamento.

Durante lo spappolamento, la materia prima (cellulosa o RCF) sotto forma di balle, una volta privata del materiale che la avvolge, viene caricata su nastri trasportatori per poi essere convogliata all'interno del pulper, un macchinario composto da un recipiente cilindrico con il fondo tronco-conico, sul quale è installato un agitatore con pale di forma particolare. Il ruolo svolto da questa sezione è quella di amalgamare le balle in ingresso con l'acqua e di sfibrarle, elementarizzandole il più possibile per favorire i successivi passaggi. Il moto vorticoso generato dalla girante infatti trascina esse verso il basso, con un progressivo impregnamento d'acqua, sul fondo urti e sforzi di taglio completano il lavoro. L'acqua impiegata generalmente viene riciclata dalla macchina continua. Il funzionamento può essere continuo o discontinuo, nel secondo caso si hanno tine in cui si accumula l'impasto e fungono quindi da polmone per il processo. Vengono inoltre aggiunti alcuni reagenti chimici utili a determinare le caratteristiche del prodotto finale o favorire la conduzione del processo.

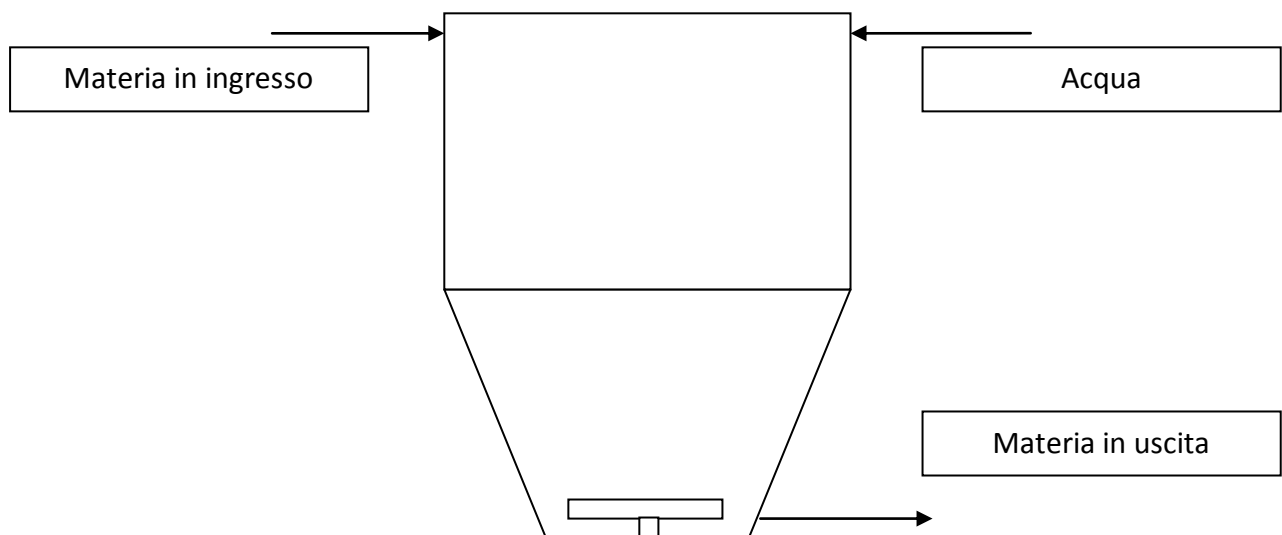
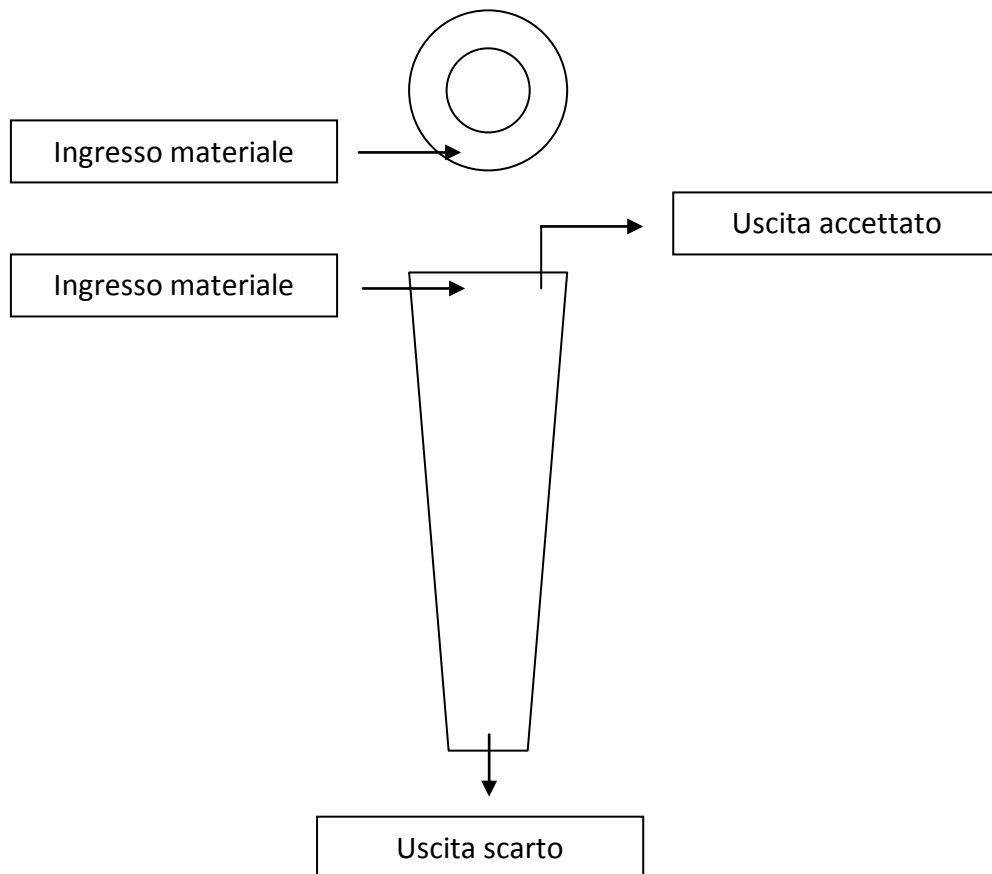


Immagine 6 - Spaccato di un pulper

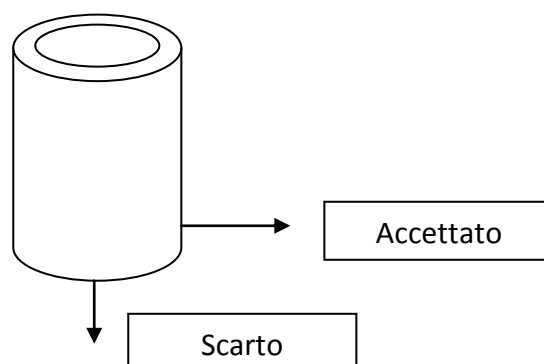


2.2.2 Epurazione.

L'epurazione, fondamentale per RCF in ingresso, serve per effettuare una pulizia del materiale che andrà a costituire il foglio di carta. I contaminanti legati alle fibre utili infatti, vengono separati una prima volta già in sede di spappolamento, tuttavia rimangono in buona parte in sospensione nella massa. I principi fisici che vengono sfruttati per realizzare l'epurazione sono la forza centrifuga (cleaners) e il passaggio entro fori e fessure opportunamente dimensionati (screen). Tramite essa è possibile eliminare componenti per differenza di peso e per differenza di forma. Nel primo caso l'impasto viene pompato verso l'interno di elementi di forma tronco conica, ed immesso in questi tangenzialmente. Il moto vorticoso che si genera fa migrare i componenti più pesanti verso l'esterno e poi verso il fondo da dove vengono espulsi, mentre l'accettato, in virtù dell'incomprimibilità dell'acqua da cui è in parte costituito, è indotto a risalire verso l'alto per poi uscire. Generalmente i cleaners vengono utilizzati sia in serie che in parallelo per ottenere la massima efficienza di pulizia.



Le particelle più grossolane vengono invece eliminate con gli screen, apparecchiature lavoranti in pressione e formate da un cestello accoppiato ad un rotore. Quest'ultimo è costituito da un cilindro metallico munito di pale che spingono le particelle verso aperture di varia forma del cestello. Il tutto è contenuto entro un involucro che riveste i due componenti, lo scarto esce in basso, mentre l'accettato esce da un'apposita apertura posta sulla superficie laterale dello stesso. Un altro componente che può essere presente in questa fase è rappresentato dai depastigliatori, un insieme di dischi fissi e rotanti che convogliano l'impasto entro particolari sezioni utili a disgregare eventuali nodi. Anche lo screening generalmente avviene in più stadi.



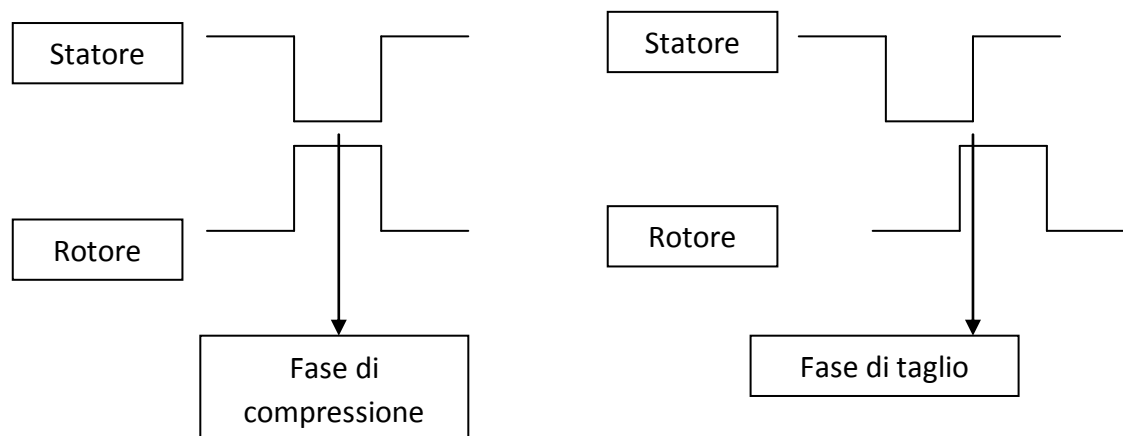
La disinchiostrazione rappresenta un'ulteriore tecnica di "pulizia", al fine di riottenere materiale fibroso bianco. Essa si mette in atto tramite flottazione o con altri processi di lavaggio. Nel primo caso in particolare, insufflando aria in una vasca contenente acqua e fibre con l'aggiunta di un tensioattivo (sostanza che favorisce l'adesione delle bolle d'aria all'inchiostro), si fa in modo che i componenti aerofili (affini con il gas) siano trascinati verso il pelo libero della vasca, mentre quelli idrofili (affini con il liquido) precipitino verso il fondo. Nel secondo caso invece si mettono in atto successive diluizioni seguite da addensamenti.

2.2.3 Miscelazione.

La miscelazione avviene all'interno di tine, in questa fase si ha l'aggiunta di eventuali additivi chimici e vi possono confluire più flussi, nel caso in cui si abbiano più spappolamenti e/o raffinazioni. Le tine sono grossi contenitori cilindrici, al cui interno l'impasto viene tenuto costantemente in agitazione. Gli additivi e gli ausiliari aggiunti all'impasto in questa fase (o nel pulper) sono: candeggiante ottico e/o colori; amido, che conferisce proprietà collanti utili a migliorare la resistenza del foglio; colle, che rendono idoneo il foglio alla scrittura; cariche minerali (carbonato di calcio e/o caolino), per migliorare opacità, bianchezza, liscio superficiale.

2.2.4 Raffinazione.

La raffinazione rappresenta una delle parti più importanti del processo cartario. Insieme alla tipologia di materia prima utilizzata ha una grande influenza sulla qualità della carta e risulta energeticamente molto onerosa. Tipica per cellulosa in ingresso, il progresso tecnologico e la ricerca di standard qualitativi sempre più elevati ne hanno favorita l'applicazione anche alle paste da carta da macero. Lo scopo del processo è quello di migliorarne le caratteristiche plastiche e feltranti. Le apparecchiature con cui esso ha luogo possono essere diverse (olandesi, raffinatori conici, raffinatori a disco), ma la modalità è la medesima, le fibre vengono pressate o sottoposte a sforzi di taglio entro guarniture di acciaio o basalto.



Come conseguenza, unitamente al fatto di utilizzare acqua come mezzo, la fibra di cellulosa viene modificata nella sua iniziale struttura tubolare (che sarebbe inadeguata per un foglio di carta):

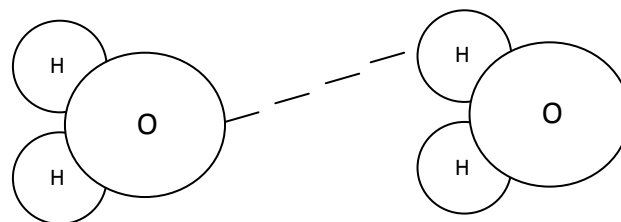
- si ha la rottura della struttura originaria ed in particolare dei legami ad idrogeno interfibra (fibrillazione interna ed esterna), la conseguenza è l'instaurarsi di nuovi legami tra fibra ed acqua con riduzione della rigidità;
- si accorcia, e questo effetto è più evidente con l'uso di fibre lunghe;
- aumenta la propria plasticità e flessibilità, ulteriore conseguenza della modifica della struttura originaria e della presenza dell'acqua nella nuova matrice fibrosa;
- si idrata rigonfiandosi, con l'acqua che a quel punto può essere liberata solo fornendo calore.

In generale la maggior superficie generatasi con zone amorfe annesse favorisce l'instaurarsi di nuovi legami, che iniziano quindi a gettare le basi per la formazione del foglio finale. La conduzione di questo fondamentale processo va fatta in funzione del tipo di carta desiderato, tuttavia gli effetti della raffinazione generalmente si identificano in:

- resistenza alla lacerazione, conseguenza del già citato aumento dei legami;
- opacità, in ragione dell'aumentata superficie per unità di massa;
- instabilità al variare dell'umidità, e quindi tendenza all'espansione ed alla contrazione al variare dell'umidità interna ed esterna;
- maggior compattezza, per gli stessi motivi già citati.

2.2.4.1 Il legame ad idrogeno.

Il legame ad idrogeno è un'interazione dipolo-dipolo che si viene a creare tra molecole con un atomo di idrogeno legato in maniera covalente con elementi molto elettronegativi (come ossigeno, fluoro o azoto) che attraggono a sé gli elettroni di legame assumendo una parziale carica negativa, con l'idrogeno che invece assume una parziale carica positiva. Questo tipo di legame si forma quando la parziale carica positiva viene in contatto con quella di segno opposto di un'altra molecola. Rappresenta il legame più forte tra due molecole (maggiore ad esempio delle forze di van der Waals), pur essendo più debole dei legami ionico, covalente e delle forze ione-dipolo.

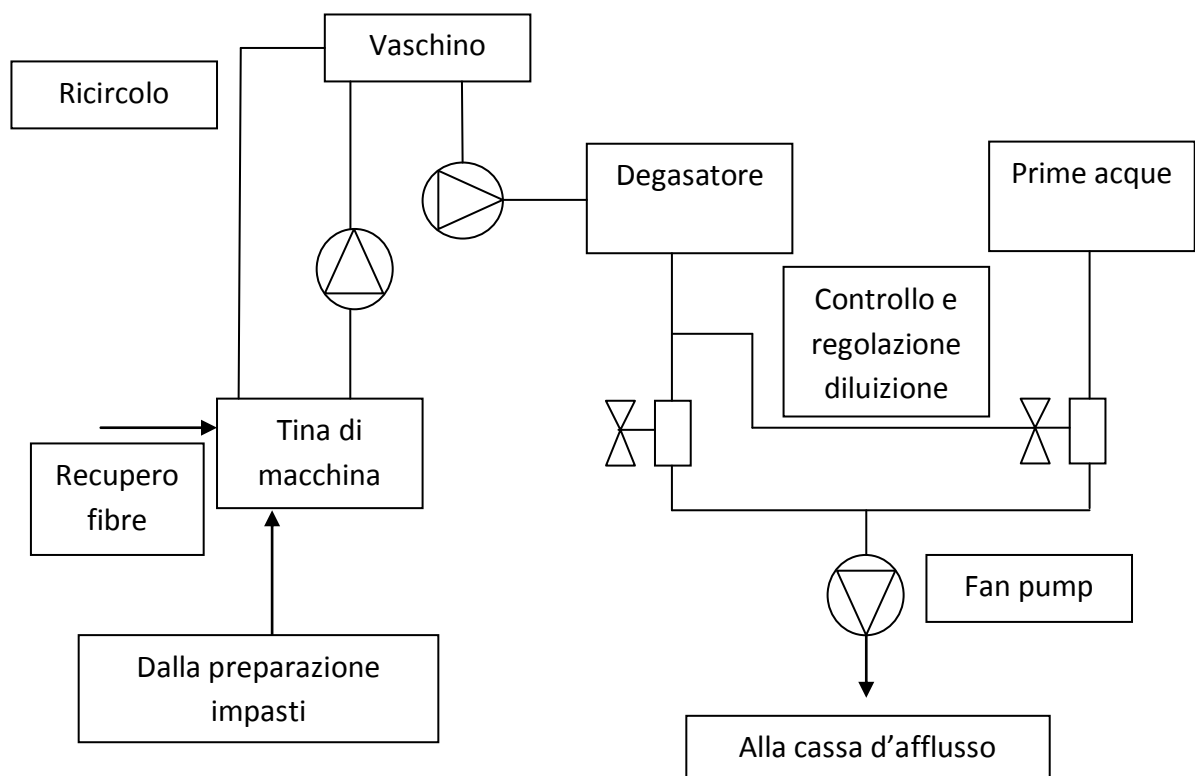


Le fibre protagoniste del processo, possiedono gruppi ossidrilici polarizzati (parzialmente carichi negativamente) che non possono legarsi tra di loro, ma che possono sfruttare "un'intercapedine" di molecole d'acqua per formare una matrice coesa. Queste ultime infatti possono unirsi tra loro e con le fibre in virtù delle caratteristiche appena descritte.

2.3 Macchina continua.

2.3.1 Testa macchina.

L'impasto formatosi nell'area di preparazione giunge quindi alla parte centrale del suo percorso, la prima zona che si incontra è quella di testa macchina. La sospensione fibrosa proveniente dalla preparazione impasti si raccoglie nella tina di macchina, all'interno della quale confluiscono anche eventuali flussi di fibre recuperati in punti successivi della macchina continua (seconde acque). Da qui l'impasto viene pompato nel vaschino (un contenitore mantenuto a livello costante), dosato con la valvola detta di grammatura e miscelato con le acque drenate nella prima parte della tavola piana (prime acque) all'interno della pompa di diluizione o fan pump. Essa è una pompa centrifuga guidata da un motore a giri variabili che determina la diluizione dell'impasto. Ha la configurazione a doppia girante, per evitare pulsazioni dovute a variazioni di portata. Associato alla fan pump, generalmente si trova il degasatore, un serbatoio collocato in alto e tenuto in depressione per poter espellere l'aria tramite ebollizione ed eventualmente un'altra sezione di epurazione, funzionante come quella descritta nella preparazione impasti. La valvola che regola la diluizione può essere azionata grazie ad un sistema di controllo che legge il valore della portata in uscita dal vaschino e fornisce il segnale per la regolazione.



La grammatura della carta, determinata in questa fase, è definita come il rapporto tra la portata alimentata e il prodotto tra la velocità e la larghezza della macchina continua.

$$gr = \frac{\dot{q}}{v \cdot l}$$

Come vedremo, il collo di bottiglia dell'impianto è solitamente rappresentato dalla capacità di essiccamento, che determina quindi la velocità massima di esercizio. A parità di velocità e di larghezza della macchina continua la grammatura è determinata dalla portata inviata dalla fan pump.

2.3.2 Formazione.

Il circuito di testa macchina è seguito dalla cassa d'afflusso, che assolve il compito di distribuire l'impasto in modo uniforme sulla tela. Si passa così alla fase di formazione. L'azione della cassa d'afflusso è strettamente correlata alla fan pump, questa sinergia è infatti fondamentale per adeguare il flusso immesso con la velocità della tela. Il mix di fibre ed acqua incontra dapprima il distributore, che deve garantire l'uniformità di velocità e pressione lungo tutta l'ampiezza della macchina continua, un circuito di ricircolo, che permette di variare la diluizione in caso di particolari problemi (ad esempio la cattiva speratura) e un diffusore a forma di imbuto, il quale consente ad eventuali fiocchi di disfarsi. Il calcolo del battente necessario per una data velocità della macchina continua è ricavabile dalla formula di Bernoulli:

$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

v rappresenta la velocità di scarico del getto, k è un coefficiente che tiene conto delle caratteristiche del fluido e della bocca d'efflusso, g è l'accelerazione di gravità (pari a $9,81 \text{ m/s}^2$) e h è il battente in metri.

L'area di formazione prosegue con tutti gli elementi necessari alla definizione del foglio. L'impasto esce dalla cassa d'afflusso tramite un getto e incontra la tela di formazione, la velocità relativa tra getto e tela influisce sulle caratteristiche della carta, rappresentando quindi un altro parametro su cui agire per variare il prodotto. La tela di formazione è un lungo foglio realizzato in tessuti sintetici avente come generatrice geometrica una linea chiusa. Presenta una bassa rigidità, necessitando del sostegno di cilindri, listelli e sbarre configurati (come vedremo) per gestire l'eliminazione graduale dell'acqua contenuta nella pasta. Le maglie dei fili in poliestere e poliammide sono infatti intrecciate in modo da garantire l'ottimale eliminazione di acqua e particelle solide, anche per non influenzare negativamente la superficie a contatto del foglio in formazione.

Con basse velocità della macchina continua la tela è sostenuta in questa area iniziale dal cilindro capotela, utile a garantire un corretto allineamento. Con elevate velocità della macchina continua questo componente ha una bassa significatività. Il forming board è un organo ceramico regolabile lungo i piani orizzontale e verticale che oltre a sostenere la tela, svolge l'importante compito di favorire "l'atterraggio" del getto limitandone l'immediato drenaggio. Successivamente si hanno i listelli foils, elementi analoghi al forming board caratterizzati da una particolare geometria del profilo e da un'inclinazione ($0,5^\circ$ - 4°) tali da rendere il listello tangente alla tela nella prima parte,

con un susseguente progressivo allontanamento da essa in grado di generare un impulso di vuoto. L'effetto è il drenaggio di una parte dell'acqua attraverso la tela. Le acque recuperate in questa prima parte della macchina continua vengono riutilizzate nel pulper.

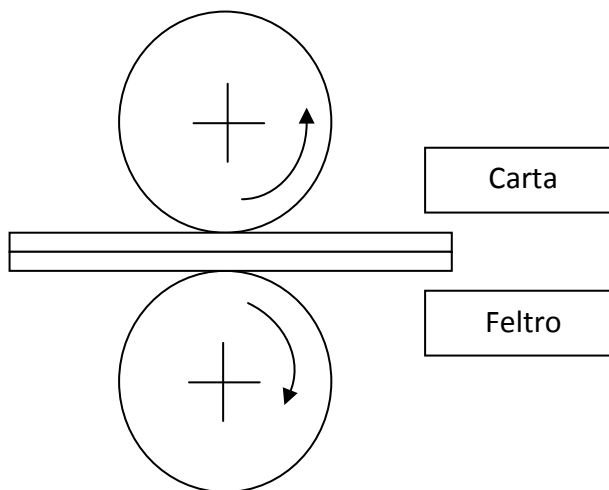
Nella sezione centrale si trova invece il cilindro ballerino, agente sulla superficie a contatto con l'aria, con effetto lisciante e "stirante", in quanto ruotante a velocità maggiori della tela. La presenza di questo grande componente è utile a compensare l'asimmetrica azione degli altri membri drenanti. In alternativa, con alte velocità di rotazione, può essere installato un telino, ossia una tela sostenuta da quattro cilindri che viene a contatto anche in questo caso con la superficie superiore del foglio, avente funzioni analoghe al ballerino. Le peculiarità sono legate alla capacità di influenzare il foglio in formazione in funzione degli angoli di contatto tra tela e telino, sia in ingresso che in uscita, ed inoltre dalla possibilità di inserire un elemento aspirante agente appunto sulla faccia superiore.

Quando forza di gravità e semplici impulsi di vuoto non sono più in grado di sottrarre acqua alla carta nascente, vengono impiegati foils collegati ad un sistema di aspirazione, con un risultante effetto fisico doppio. Dopo questi, si installano le casse aspiranti, contenitori connessi ad un sistema di aspirazione molto più spinto, con superfici di contatto piane, onde evitare deformazioni della tela per le elevate depressioni in gioco. Le casse a basso vuoto hanno la regolazione di questo parametro grazie a valvole o grazie a dispositivi comandati ad aria. Quella ad alto vuoto sono generalmente regolate ad "aria falsa".

Il cilindro aspirante è l'ultimo componente di questa area. Esso ha il compito di trascinare la tela, oltre che di garantire un assorbimento d'acqua tale da favorire il distacco del foglio dalla stessa. Strutturalmente presenta scanalature sulla superficie laterale, collegate con un alto grado di vuoto. Le depressioni in tutto questo circuito sono realizzate tramite ventilatori, o con pompe ad anello liquido.

2.3.3 Pressatura.

Dopo i cilindri aspiranti le fibre vengono a contatto con i feltri umidi, questi servono per asportare l'acqua fatta emergere da robusti cilindri contrapposti che ruotano esercitando un'elevata pressione sul materiale, da ciò il nome della sezione "presse".



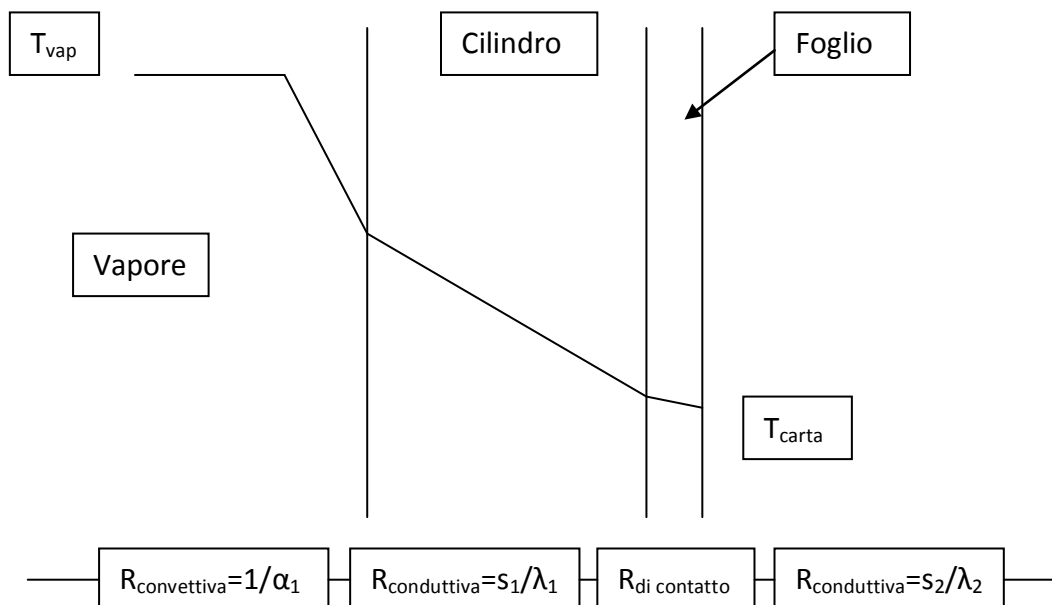
Fisicamente, una pressa in corrispondenza della linea di contatto induce una riduzione di sezione del sistema carta-feltro, facendo sì che l'acqua (fluido incompressibile) abbia meno spazio a disposizione e sia costretta a migrare dal foglio. In particolare, dopo tale zona l'acqua rimane intrappolata nel feltro e poi successivamente scaricata. Per garantire una distribuzione omogenea di pressione entro tutta la larghezza del foglio, i cilindri non sono rigorosamente tali, bensì solidi rotanti attorno al proprio asse con superficie laterale generata da un arco di cerchio (similmente ad una botte). Questo perché la pressione è esercitata sui supporti.

Questa è una parte molto importante del processo, in primis perché sfruttando esclusivamente impulsi di depressione come nell'area precedente non sarebbe possibile portare il contenuto di umidità al valore desiderato. In secondo luogo, ottimizzando la sezione presse, si hanno vantaggi in termini di risparmio energetico sulla zona successiva (seccheria), che risulta molto onerosa da quel punto di vista. Un grado di secco maggiore all'ingresso della fase di asciugamento implica infatti minor consumo di vapore, tuttavia la politica generalmente adottata è quella di continuare a sfruttare al massimo la seccheria aumentando la velocità della macchina continua e la portata erogata dalla fan pump a parità di grammatura, ottenendo così una diminuzione del consumo specifico. Oltre alla funzione drenante, le presse con la loro azione concorrono anche alla corretta formazione del foglio. La teorica linea di contatto tra i cilindri è in realtà una superficie chiamata nip. Come è facilmente intuibile, l'intensità della pressione e il tempo durante il quale la carta è sottoposta a pressatura (e quindi la velocità della macchina continua) sono i due parametri che influenzano il grado di secco ottenibile.

2.3.4 Seccheria.

La seccheria, atto finale dell'asciugatura, provvede ad asportare l'acqua residua per giungere al tasso di umidità voluto in uscita. Dopo le presse infatti, il foglio contiene ancora dal 45% al 60% di umidità. Vi sono diverse configurazioni possibili come vedremo, tutte accumulate dall'utilizzo dell'energia termica, sottoforma di calore sensibile dell'aria calda o sottoforma di calore latente del vapore saturo. Il principio fisico sfruttato è quello di far evaporare l'acqua per espellerla dal foglio, e questo deve avvenire senza che esso risulti danneggiato. La quota di vapore acqueo che si forma esce da questa sezione insieme all'aria, mezzo indispensabile per far avvenire il processo.

La conduzione e la convezione sono i meccanismi che entrano in gioco e che governano lo scambio. Comune ad entrambi si ha una differenza di temperatura tra due sistemi che innesca il processo. La conduzione è spiegabile microscopicamente con l'oscillazione molecolare direttamente proporzionale alla temperatura del sistema. Le molecole oscillanti urtandosi si trasmettono quantità di moto, causando macroscopicamente variazioni di temperatura lungo le coordinate spaziali e nel tempo. La convezione si innesca in presenza di fluidi (e quindi con mezzi non vincolati in una matrice rigida come nel caso di un corpo solido), le cui molecole, a contatto con un corpo più caldo aumentano la propria temperatura per conduzione, e subito dopo migrano lontano dal corpo grazie alla spinta di Archimede. L'analogia elettrica permette di studiare i fenomeni di conduzione considerando il flusso termico l'equivalente della corrente, la differenza di temperatura l'equivalente della differenza di tensione, il reciproco dei coefficienti di convezione e lo spessore diviso la conducibilità gli equivalenti delle resistenze convettive e conduttiva (in presenza di solidi a contatto si considera una resistenza aggiuntiva di contatto appunto).



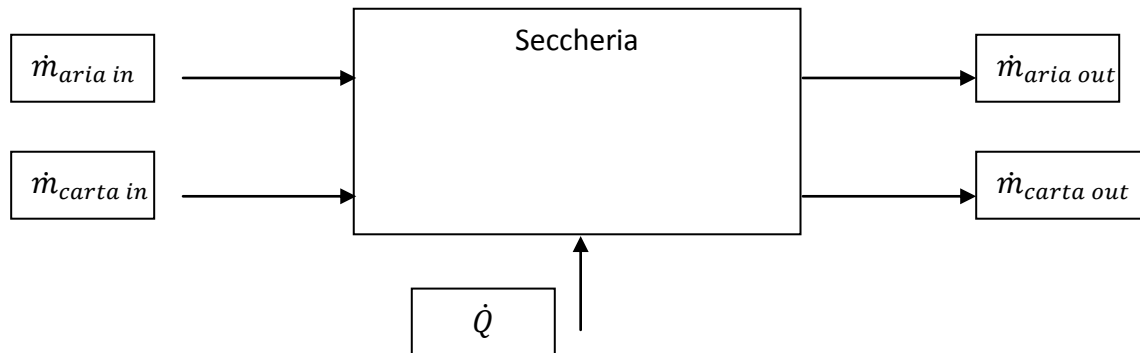
Nel caso studio in questione, il vapore saturo prodotto tramite i servizi ausiliari scambia calore convettivamente con la parete interna del cilindro essiccatore, l'energia termica si propaga in

modo conduttivo entro lo spessore dello stesso e nel foglio di carta. Se sono presenti le cappe, il calore sensibile di un fluido aeriforme si trasferisce direttamente in modo convettivo sul foglio. L'acqua da espellere viene dapprima riscaldata fino alla temperatura di evaporazione, quindi fatta evaporare fino al livello di secco desiderato. L'estrazione dell'umidità dipende dalla differenza tra la tensione di vapore della carta e quella dell'ambiente circostante, da ciò l'importanza dell'aria e delle sue condizioni termodinamiche. L'aumento del grado di secco inizialmente ha un andamento costante, successivamente è decrescente nel tempo, in quanto diventa sempre più difficile estrarre acqua mano a mano che la sua percentuale nel foglio diminuisce.

Qualunque sia la soluzione tecnologica scelta, fissate alcune condizioni, è possibile calcolare la quantità di calore necessaria all'asciugamento con semplici bilanci di massa ed energia:

$$\dot{m}_{aria\ in} + \dot{m}_{carta\ in} = \dot{m}_{aria\ out} + \dot{m}_{carta\ out}$$

$$h_{aria\ in} \cdot \dot{m}_{aria\ in} + h_{carta\ in} \cdot \dot{m}_{carta\ in} + \dot{Q} = h_{aria\ out} \cdot \dot{m}_{aria\ out} + h_{carta\ out} \cdot \dot{m}_{carta\ out}$$



Come accennato sopra, laddove si utilizzi vapore, si usa quello saturo. Con vapore saturo si intende quel vapore che coesiste con il liquido da cui è generato (collocato internamente alla "campana" dei grafici temperatura-entropia ed entalpia-entropia), e che risponde ad una somministrazione di calore con un aumento del proprio grado di secco a parità di temperatura. Qualora si continuasse a fornire calore ad un vapore che ha raggiunto il titolo del 100% (nessuna particella liquida), otterremmo invece un aumento di temperatura, entrando nel campo del vapore surriscaldato.

Immagine 7 - Diagramma Ts dell'acqua

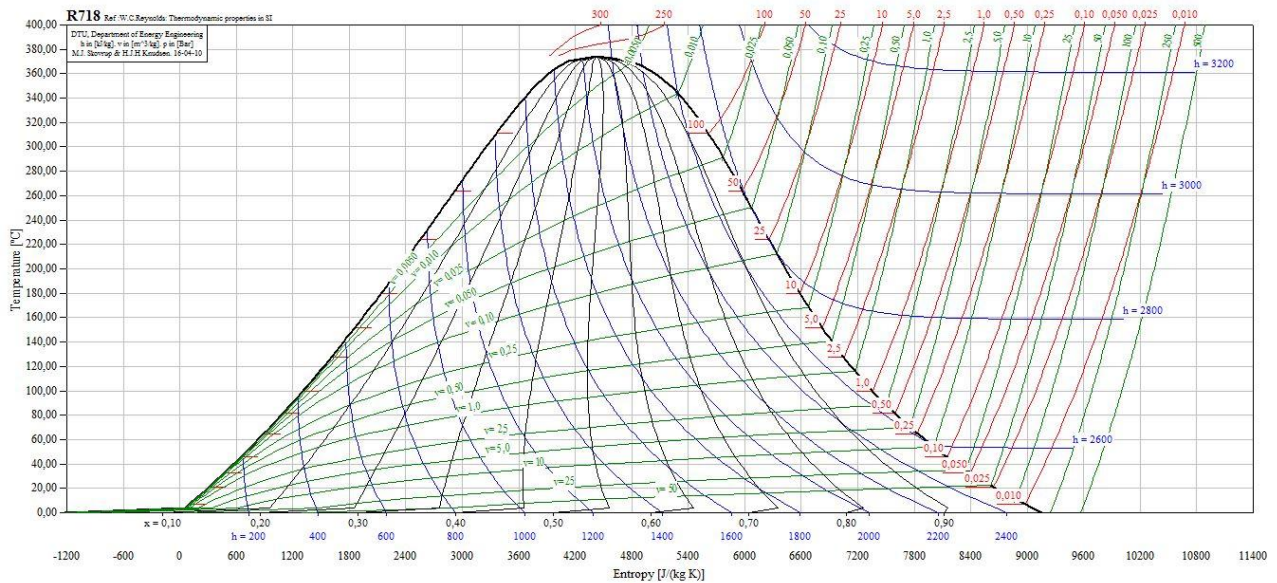
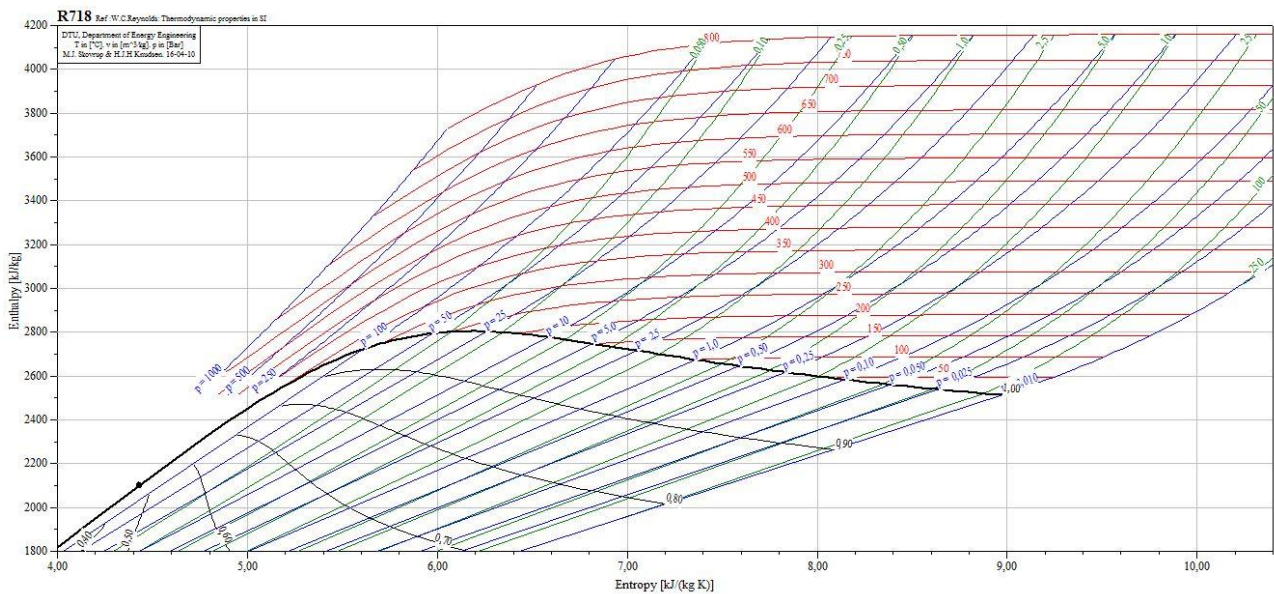


Immagine 8 - Diagramma Hs dell'acqua



Il vapore saturo a parità di pressione occupa un minor volume, e a contatto con materia più fredda condensa producendo liquido. L'utilizzo di questa tipologia è quindi vantaggioso in termini di spazio occupato, tenute ed estrazione delle condense dello stesso. L'utilizzo di vapore saturo ad una pressione maggiore implica anche una temperatura maggiore (e una differenza di temperatura vapore-foglio maggiore) e quindi facilita il passaggio di calore favorendo l'aumento di velocità della macchina continua, tuttavia riduce il calore latente (la campana si restringe) necessitando maggiori portate e svantaggi qualitativi della carta per le elevate temperature superficiali.

2.4 Lavorazioni finali.

Le lavorazioni finali comprendono solitamente quei passaggi utili a fornire il prodotto nel formato previsto. Nel dettaglio: il foglio viene avvolto attorno ad un'anima, movimentato tramite carroponte in una zona deputata allo svolgimento del rotolo, dimensionato opportunamente e ribobinato. A questo punto è pronto per l'utilizzo diretto o per la cartotecnica.

2.5 Trattamento acque.

Con trattamento acque si va ad indicare l'insieme di procedure atte a purificare l'insieme dei flussi d'acqua recuperati in alcuni punti del processo principale (drenaggi tavola piana, etc.) per poterli riutilizzare o scaricare all'esterno.

L'acqua e i suoi utilizzi sono soggetti a normative volte a salvaguardarla, in quanto bene prezioso per l'ecosistema. In uno stabilimento di cartiera, come abbiamo visto, è indispensabile: spappolamento, raffinazione, epurazione, formazione del foglio non sarebbero possibili senza. Lo scarico viene attentamente monitorato, affinché il ciclo subito non alteri le caratteristiche fisico-chimiche del prezioso liquido al punto da influenzare negativamente la sua interazione con l'ambiente. Le leggi in merito sono sia nazionali che europee. I motivi fin qui elencati, uniti ad altri di carattere energetico, nel tempo hanno suscitato l'interesse per un trattamento sempre più complesso ed efficiente dei flussi di acqua coinvolti nei processi produttivi. Le possibilità di recuperare fibre utili (come detto nel paragrafo sulla fase di testa macchina), di movimentare minori volumi d'acqua totale, di acquistarne una minor quantità rappresentano i principali vantaggi che hanno spinto in questa direzione. Sono comunque presenti alcuni svantaggi che pongono limiti a questo intervento, soprattutto a carattere qualitativo (un ciclo chiuso con bassa percentuale di reintegro mina inevitabilmente le proprietà del foglio).

Le alterazioni dello stato dell'acqua possono riguardare un aumento della temperatura, una variazione del pH, una mancanza di ossigeno e l'immissione di sostanze inquinanti. Le sostanze inquinanti presenti nelle acque in uscita sono di tre tipi:

- fibre e altre sostanze sedimentabili, tendenti a precipitare sul fondo in quanto più pesanti dell'acqua;
- sostanze colloidali, soggette a mutua repulsione e separabili solo tramite l'ausilio di particolari reagenti;
- sali inorganici disciolti nell'acqua.

I processi volti alla depurazione possono essere di tipo meccanico, chimici o biologico. Tra i primi, basati su principi fisici e meccanici e rivolti a quelle sostanze non disciolte nell'acqua, si annoverano:

- la filtrazione tramite griglie, utile a separare le parti più grossolane;
- equalizzazione ed omogeneizzazione, al fine di rendere costante la concentrazione degli inquinanti;

- la sedimentazione, che avviene in reattori circolari a fondo tronco conico, nel quale si depositano le particelle più pesanti. L'acqua purificata viene raccolta dall'alto, il fondo viene opportunamente liberato dai fanghi formati alla fine di ogni ciclo. Per trattare le sostanze colloidali si utilizzano sostanze coagulanti;
- flocculazione, per trattare le sostanze colloidali si utilizzano sostanze coagulanti non sufficientemente pesanti per sedimentare, l'aggiunta di ulteriori reagenti permette la formazione di fiocchi di maggior densità e più facilmente trattabili;
- flottazione, già descritta riguardo alla disinchiostrazione, che permette la separazione di componenti aerofili da componenti idrofili mediante l'aggiunta di un reagente tensioattivo;
- filtrazione delle particelle fini.

I trattamenti chimici sono basati sull'aggiunta di sostanze che inducono reazioni chimiche. I principali sono:

- la neutralizzazione, che consiste nella correzione del pH tramite l'uso di reagenti acidi o basici;
- la precipitazione, ossia l'impiego di un reagente che formi una sostanza insolubile che poi precipita sul fondo;
- disinfezione, ossia la procedura per eliminare virus e batteri.

I trattamenti biologici (se presenti) utilizzano microrganismi e operano, a seconda della tipologia, in condizioni aerobiche o anaerobiche. I meccanismi sono analoghi a quelli che avvengono spontaneamente in natura, sono molto importanti per la separazione dei solidi disciolti in acqua.

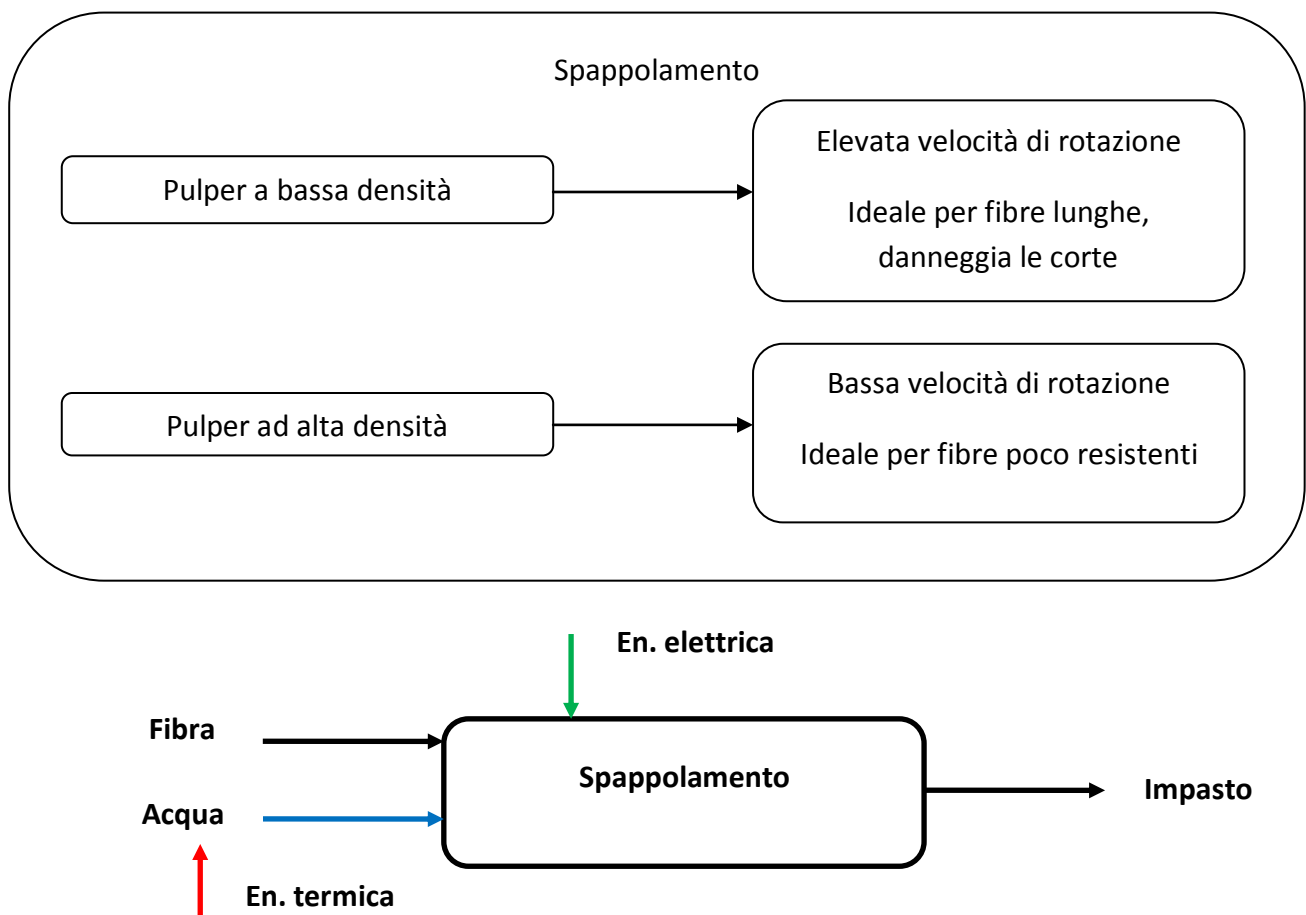
Da un punto di vista energetico questa sezione può rivestire un certo interesse nel caso in cui il passaggio successivo sia il trattamento dei fanghi. Essiccando le sostanze eliminate dalle acque di cartiera infatti, è possibile ottenere un materiale di origine organica che fornisca un combustibile, attraverso un digestore anaerobico (che rientra nella categoria dei trattamenti biologici).

Riferimenti: [7], [10], [11], [12].

3. Tecnologie e variabili di processo: approfondimento per ogni singola sottofase, materia prima utilizzata, tipologia di prodotto finito.

3.1 Analisi delle variabili tecnologiche per sottofase.

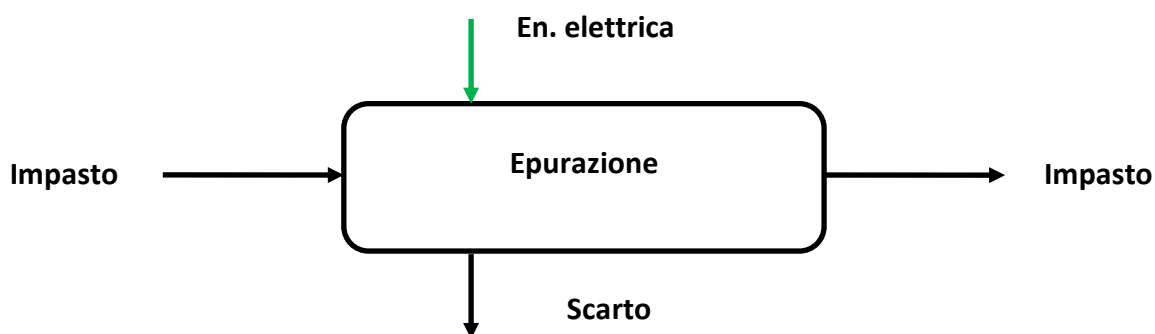
La prima variabile operativa che va ad incidere sui consumi della fase di spappolamento, è la consistenza dello stesso, ovvero la concentrazione della materia in uscita dal pulper. La natura di quest'ultima, e soprattutto la destinazione d'uso in uscita incidono su tale parametro. La seconda è l'intensità di spappolamento, ossia il grado di sfibratura desiderato. Strettamente connesso a questa seconda variabile è il tempo di spappolamento, le tine di accumulo accennate nel precedente capitolo come detto consentono di agire su questa variabile. La temperatura rappresenta invece un parametro di tipo fisico che influenza il processo: alte temperature favoriscono la disintegrazione delle fibre. Un valore tipico di temperatura dell'acqua di alimentazione è 50°C. Da un punto di vista tecnologico si possono trovare pulper a bassa densità, caratterizzati da: elevata velocità di rotazione, consistenza del 3-5 % in peso, capaci di aprire bene la fibra lunga ma anche di danneggiare le fibre poco resistenti, valori tipici del consumo sono 25-50 kWh/t; oltre a questi si hanno i pulper ad alta densità: in questo caso abbiamo basse velocità di rotazione con una diversa conformazione delle pale, consistenza del 13-18 %, risultano ideali per fibre poco resistenti e fogliacci, con un consumo di 15-30 kWh/t. L'acqua che va ad alimentare lo spappolatore è riciclata dalla macchina continua.



Nello schema riassuntivo dei flussi c'è anche quello dell'energia termica, in quanto è necessario che l'acqua immessa sia calda (come detto sopra). La pratica comune è quella di immettere nel pulper le acque recuperate dalla macchina continua per motivi di risparmio energetico, laddove si avesse un disavanzo di vapore prodotto è possibile immettere questo con l'acqua per favorire il dissolvimento delle fibre, oppure utilizzarlo per riscaldare la stessa prima dell'ingresso nello spappolatore. Di seguito la tabella che riassume i dati quantitativi che indicativamente caratterizzano uno stabilimento, l'energia termica in ingresso è stimata come quella necessaria a portare l'acqua dalla temperatura ambiente ad una temperatura di circa 50°C.

Materia in ingresso		
Fibra	Grado di secco	~90%
Acqua	Temperatura	~40÷60 °C
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~3÷18 %
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~15÷50 kWh/t
Consumo energia termica		~2·10 ⁻⁵ kWh/t

In sede di epurazione l'unica variabile che va ad incidere sui consumi di energia elettrica è la tipologia di materia in ingresso. Le differenze tecnologiche tra due o più componenti aventi la stessa funzione (e che sfruttano il medesimo principio fisico) non comportano sostanziali differenze di consumo.



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~3÷18%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~5%
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~10÷20 kWh/t

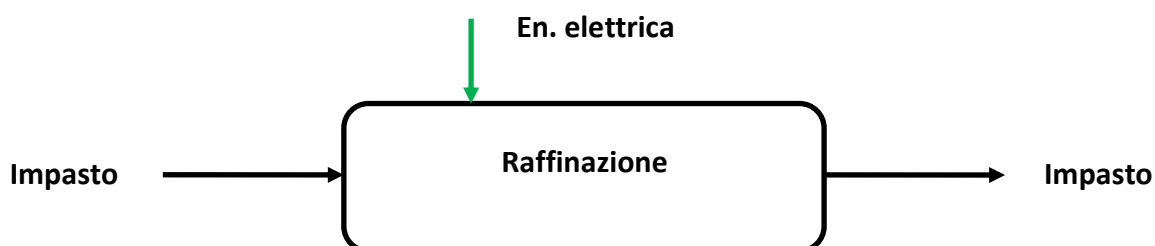
Le variabili che vanno ad incidere sui consumi del processo di raffinazione sono molteplici. In primo luogo il tipo di fibra usata: se è di tipo lungo il processo è più energivoro, se è di tipo corto invece è meno oneroso energeticamente. In secondo luogo il prodotto finale: maggiore deve essere la resistenza meccanica e maggiore deve essere la raffinazione. Infine il tipo di raffinatori impiegato: si distinguono raffinatori conici, raffinatori a disco e pile olandesi.

I primi sono formati da uno statore e da un rotore di forma conica muniti di lame. Le fibre entrano dalla sezione con minor diametro, vengono trascinate dalla forza centrifuga e dalla velocità di rotazione e sottoposte alle azioni delle lame. Si ha la possibilità di regolare la distanza tra le lame statoriche e rotoriche, spostando assialmente il componente rotante e andando a variare l'intensità di raffinazione. Tramite una valvola si può variare anche il flusso in ingresso, determinando quindi il tempo di residenza. L'angolo di inclinazione del cono rappresenta un'altra importante variabile. In generale questo tipo comporta un maggior consumo, ma anche una miglior qualità.

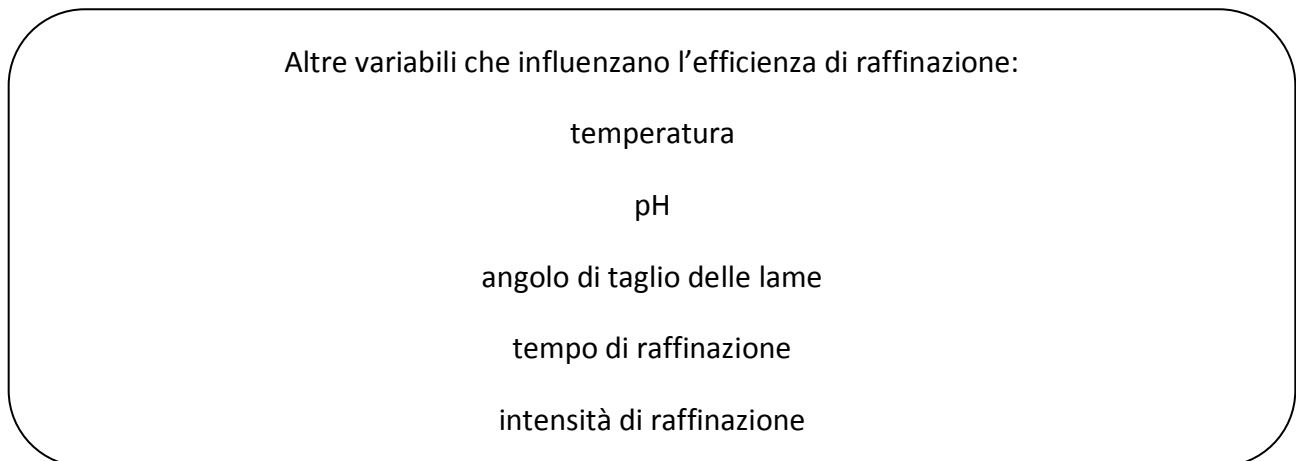
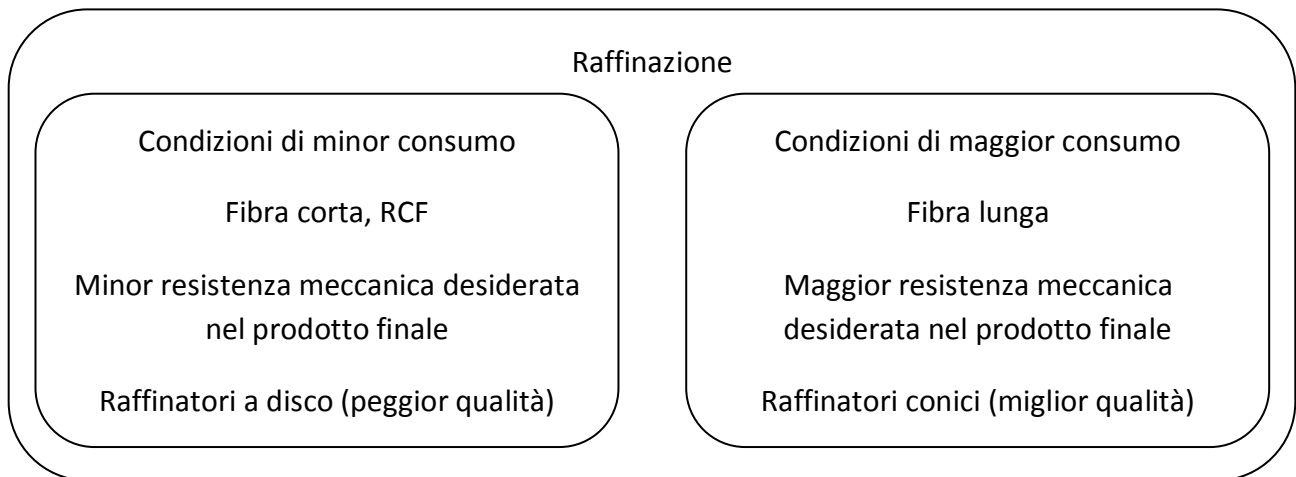
I raffinatori a disco sono suddivisibili in altre due sottotipologie: a disco singolo o a disco doppio. I primi sono formati da un disco fisso e da uno rotante, la modulazione avviene come nel caso dei raffinatori conici (valvola che regola la portata e grado di libertà assiale del disco mobile). I secondi sono costituiti da un disco fisso munito di lame su entrambi i lati, e in grado di muoversi parallelamente al proprio asse, accoppiato a due dischi fissi. I raffinatori a disco forniscono materiale in uscita qualitativamente inferiore ma permettono di risparmiare energia.

I raffinatori a pile olandesi sono formati da una vasca divisa in due canali che hanno la sezione variabile, essi sono attraversati da un cilindro che effettua il pompaggio della pasta facendola circolare. Questo ultimo tipo di apparecchiature tuttavia sono ormai in disuso.

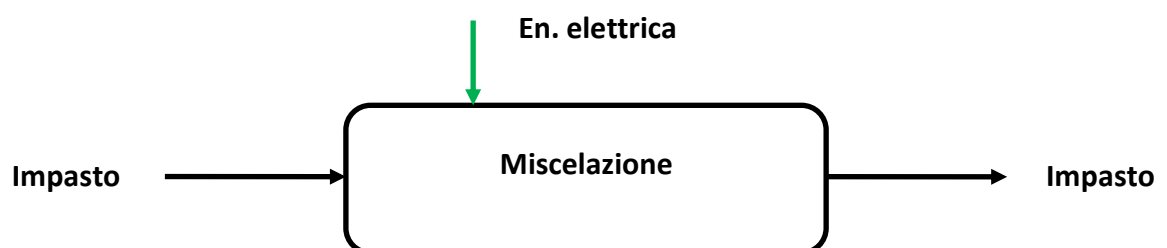
Durante la raffinazione si genera molto calore per attrito, per migliorarne l'efficienza si deve cercare di abbassare la temperatura. Anche un aumento del pH ha un effetto positivo, comportando una miglior idratazione. In realtà può essere effettuata un'analisi più approfondita, le perdite di lavoro utile sono proporzionali a: angolo di taglio delle lame, tempo di raffinazione, intensità di raffinazione, densità dell'impasto (se essa è maggiore la raffinazione risulta migliore, seppur più energeticamente onerosa). Come detto nel precedente capitolo, questa è una lavorazione tipica per fibra vergine in ingresso, non mancano esempi di impianti alimentati con fibra riciclata sprovvisti di raffinatori.



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~5%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~5%
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~70÷150 kWh/t

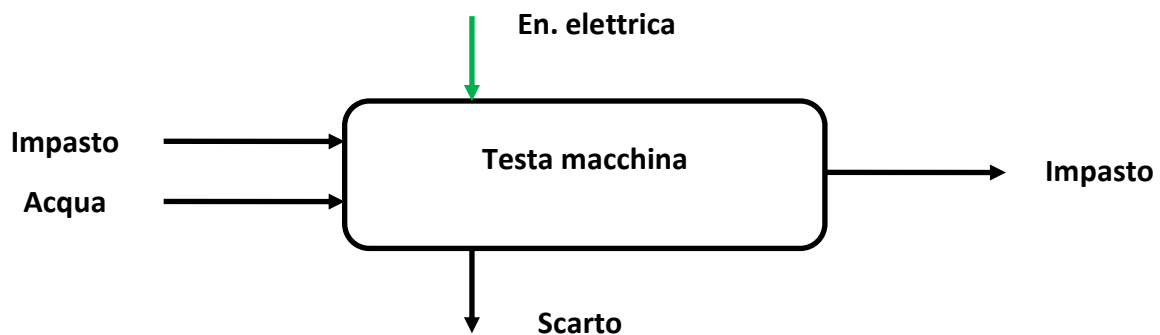


In fase di miscelazione non si hanno particolari alternative, vista la natura stessa del processo che è "di passaggio", senza trasformazioni fisiche di rilievo.



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~5%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~1%
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~5÷10 kWh/t

La parte di testa macchina, così come quella di formazione, presenta come variabile operativa la grammatura desiderata in uscita. L'aspetto costruttivo al solito è influenzato dal tipo di sostanze alimentate, come detto già nella descrizione del capitolo 2, in quanto possono esserci o non esserci passaggi di epurazione ulteriori.



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~1%
Acqua	Temperatura	~10°C
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~5%
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~40÷70 kWh/t

La cassa d'afflusso rappresenta un primo caso interessante in merito alle alternative che offre, costituenti in realtà più un'evoluzione tecnologica nel tempo.

Si hanno casse aperte, che come dice il nome nella parte superiore sono a contatto con la pressione atmosferica, presentano diaframmi di separazione atti ad uniformare il flusso di pasta e labbro in uscita regolabile. Il limite è rappresentato dalla bassa capacità di adattarsi ad alte velocità, in quanto è necessario un battente sempre maggiore (la regolazione segue la regola di Bernoulli).

Le casse chiuse, non aperte in alto come le precedenti, ovviano ai limiti delle precedenti mediante una pressurizzazione dell'interno della cassa tramite aria.

Le apparecchiature più moderne sono rappresentate da quelle idrauliche, chiuse e senza insufflazione d'acqua, con l'impasto mantenuto in pressione che dopo l'attraversamento di una sezione costante percorre dei condotti con superficie di passaggio crescente e una camera di omogeneizzazione; e dalle casse d'afflusso a diluizione, che presentano la particolarità di poter regolare la grammatura direttamente in cassa con l'immissione d'acqua. Ci sono infatti una serie di tubicini in corrispondenza del labbro di uscita, il quale non presenta regolazioni pneumatiche ma può essere solo alzato ed abbassato. Questo fatto, unitamente all'eventuale presenza di uno smorzatore di vibrazioni (polmone contenente l'impasto ed un cuscino d'aria), risponde all'esigenza di smorzare il più possibile le vibrazioni.

Cassa d'afflusso: sviluppo nel tempo

Casse aperte: usate in passato, inadeguate alle alte velocità

Casse chiuse: naturale sviluppo delle prime

Casse idrauliche: più efficienti delle prime due

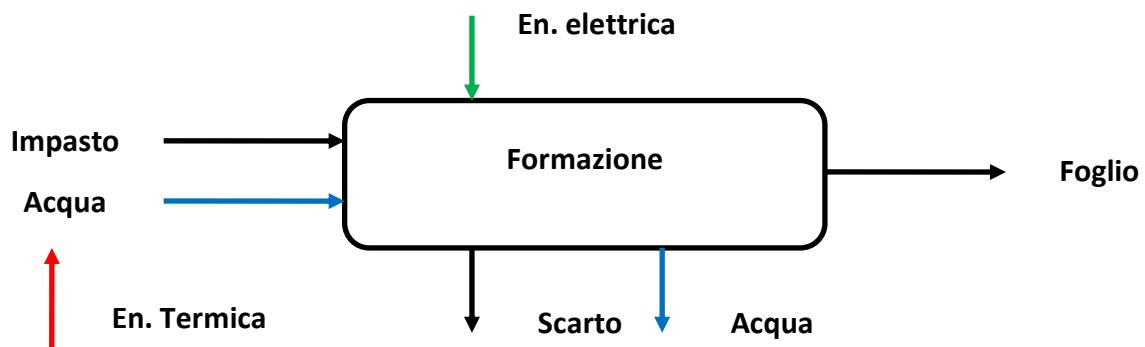
Casse a diluizione: ancora più performanti, rappresentano la soluzione più

La parte centrale dell'area di formazione, descritta in precedenza secondo la tradizionale tipologia a "tavola piana", può in realtà essere condotta anche con la tecnologia "crescent former". In questo caso l'impasto viene inviato nell'interstizio tra una tela ed un feltro congiunti. Oltre a vantaggi qualitativi, si hanno sensibili risparmi di energia per la miglior capacità drenante del sistema e quindi per la minor necessità di vuoto.

Parte centrale della fase di formazione

Tavola piana

Crescent former



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~5%
Acqua	Temperatura	~60°C
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~20%
Acqua	Temperatura	~10°C
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~80÷150 kWh/t
Consumo energia termica		~3·10 ⁻⁵ kWh/t

In sede di pressatura si hanno molte variabili tecnologiche e molti fattori che influiscono sull'efficienza del processo. Abbiamo già detto di come tempo di pressatura, area di contatto e intensità della pressione siano i tre principali parametri su cui si interviene per migliorare l'efficienza. Si riportano innanzitutto le varianti costruttive:

- presse piane, con il cilindro premente (in stonite, granito o altri materiali duri) posizionato superiormente;
- presse inverse, con i cilindri invertiti;
- presse montanti, con la lisciatura del lato tela (e non del lato feltro), la carta viene fatta passare al di sotto del cilindro con il feltro, poi viene invertita la rotazione, avviene il passaggio nel nip e quindi torna nel senso di rotazione della macchina.

Un'altra classificazione più dettagliata è la seguente:

- la pressa tradizionale, con il cilindro superiore (mobile) che preme sul sottostante (fisso) grazie al suo peso e a molle;
- pressa fabric, che include una tela tra cilindro e feltro, favorendo il drenaggio con pressioni più ridotte;
- pressa a fori ciechi, che permette all'acqua drenata di incontrare oltre il feltro alcuni fori di alloggio temporaneo, che si vuotano nel proseguo della rotazione del cilindro, utilizzato con alte velocità di rotazione;

- pressa aspirante, che presenta un cilindro inferiore con una serie di fori connessi ad una cassetta aspirante (descritta in precedenza), l'acqua aspirata viene poi espulsa grazie alla forza centrifuga o per gravità;
- pressa scarpa, che è quella più all'avanguardia, essendo caratterizzata da una zona di contatto tra i cilindri (nip) più estesa rispetto agli altri tipi. Scendendo più in dettaglio, il cilindro superiore va ad esercitare la pressione su di una camicia che segue il movimento del cilindro, sotto la camicia è presente l'organo chiamato scarpa che preme in senso opposto.

Presse: classificazione 1

Presse piane

Presse inverse

Presse montanti

Presse: classificazione 2

Presse tradizionali

Presse fabric

Presse a fori ciechi

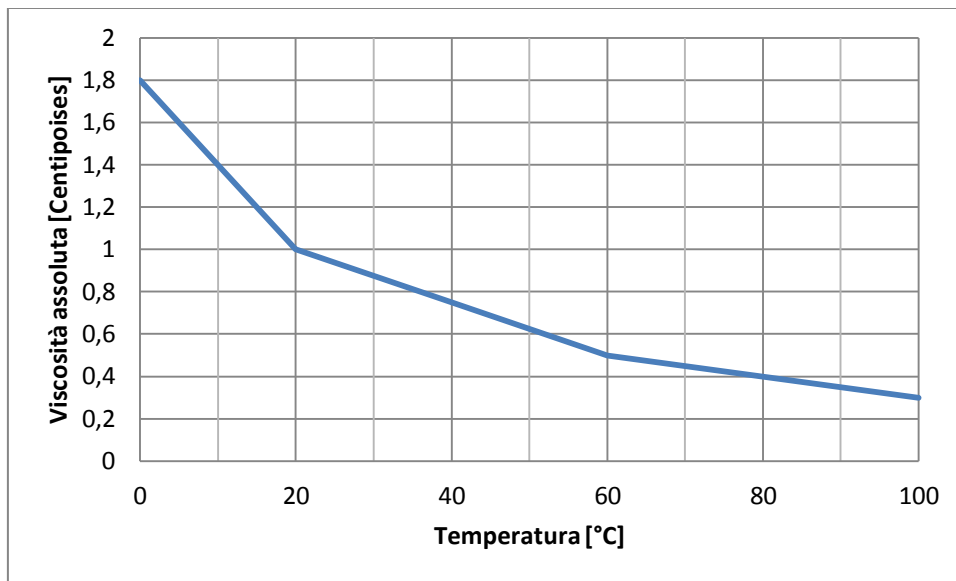
Presse aspiranti

Presse scarpa

Le altre variabili di cui si deve tener conto sono:

- il grado di raffinazione, maggiore è questo fattore, peggiore risulta l'asciugamento;
- la temperatura, un suo aumento comporta la diminuzione della viscosità e quindi un aumento della capacità di asciugamento.

Immagine 9 - Grafico viscosità-temperatura per l'acqua



Presse: variabili fisiche che influenzano il processo

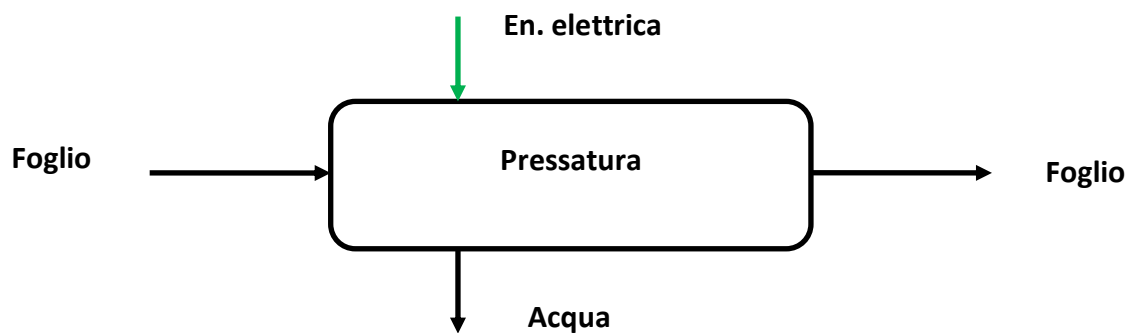
Tempo di pressatura

Intensità della pressione

Larghezza del nip (area di contatto)

Grado di raffinazione

Temperatura

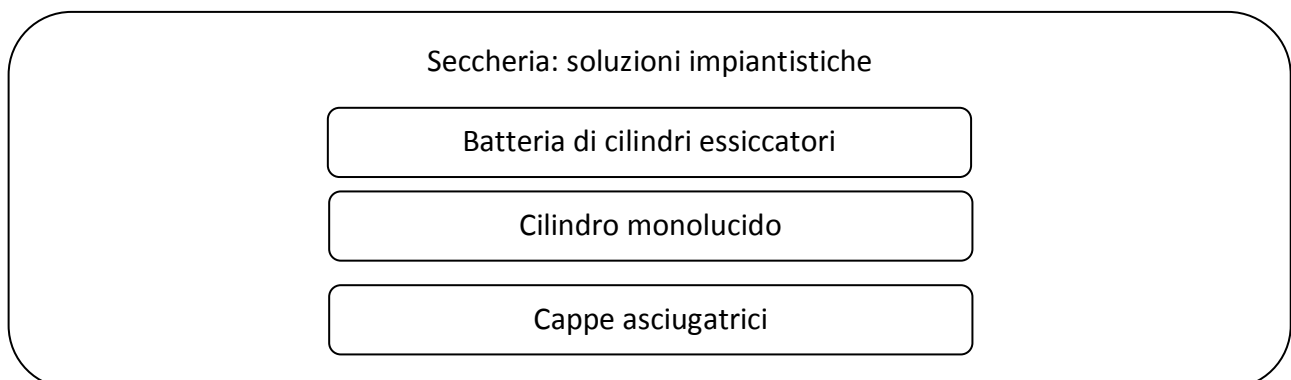


Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~20%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~50%
Acqua		
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~30÷70 kWh/t

Passando alla seccheria, cuore dell'intero processo, si osserva che le principali possibili configurazioni sono le seguenti:

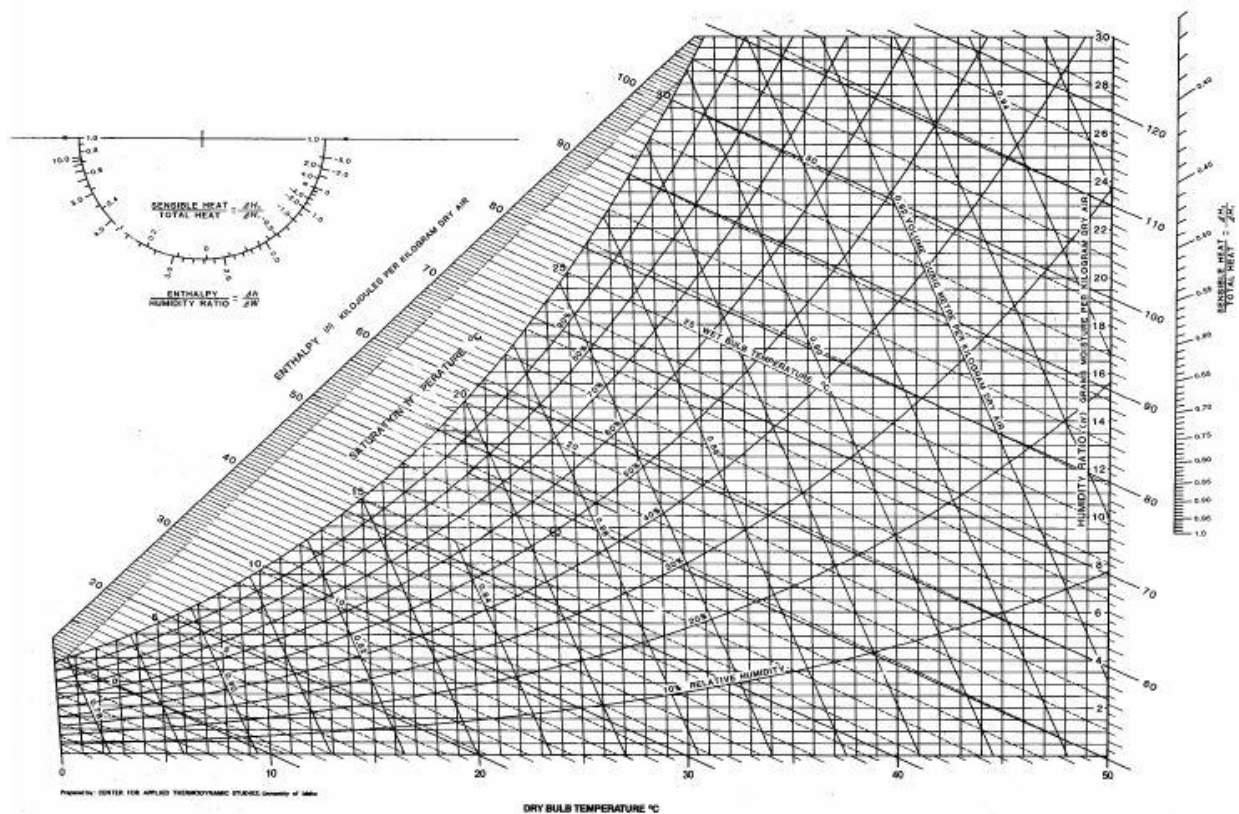
- batteria di cilindri essiccatori, realizzati in ghisa o in acciaio, all'interno dei quali si ha il processo di condensazione del vapor saturo con cessione di calore al foglio di carta, il quale attraversa questa sezione sostenuta dagli stessi cilindri. Anche intuitivamente si deduce che non viene utilizzata con carte a bassa resistenza meccanica, che non sarebbero in grado di resistere al tiraggio a cui sono sottoposte tra un cilindro e l'altro per via della disidratazione. La suddivisione in più unità essiccatrici consente di seguire un'idonea curva di essiccamento. L'estrazione delle condense avviene grazie a componenti che creano una differenza di pressione. Gli schemi di impianto che permettono il recupero del vapore utilizzato e del successivo riutilizzo possono essere in cascata o con termocompressore. Si possono avere associate le cappe di estrazione delle fumane;
- cilindro monolucido, un componente unico che ha un funzionamento analogo a quelli della batteria, viene utilizzato per i formati di carta non adatti alla precedente soluzione, con associati gli elementi aggiuntivi visti anche nei cilindri essiccatori. L'adesione del foglio alla superficie metallica avviene grazie al film di liquido che ci si interpone, la progressiva disidratazione porta all'aderenza diretta della carta e al distacco finale;
- cappe asciugatrici, che si integrano con uno dei due tipi precedenti andando a completare la loro azione mediante il calore sensibile di aria (o fumi di combustione).

Da un punto di vista fisico i consumi dipendono dalle condizioni della carta in ingresso (ossia con che grado di secco si entra in questa fase), dal tipo di carta che si sta producendo e, importante, dalle condizioni igrometriche dell'aria, il mezzo deputato a veicolare all'esterno l'umidità estratta.



Dalla termodinamica dell'aria umida si sa infatti che essa è una miscela di aria secca (azoto ed ossigeno) e vapore acqueo, e quindi non una sostanza pura. Vista il sufficiente stato di "rarefazione" della miscela si effettua il suo studio secondo le leggi dei gas perfetti, a partire da queste si possono costruire grafici termodinamici che, fissate alcune variabili come ad esempio la pressione atmosferica, permettono di individuare le grandezze che caratterizzano un preciso stato.

Immagine 10 - Diagramma dell'aria umida



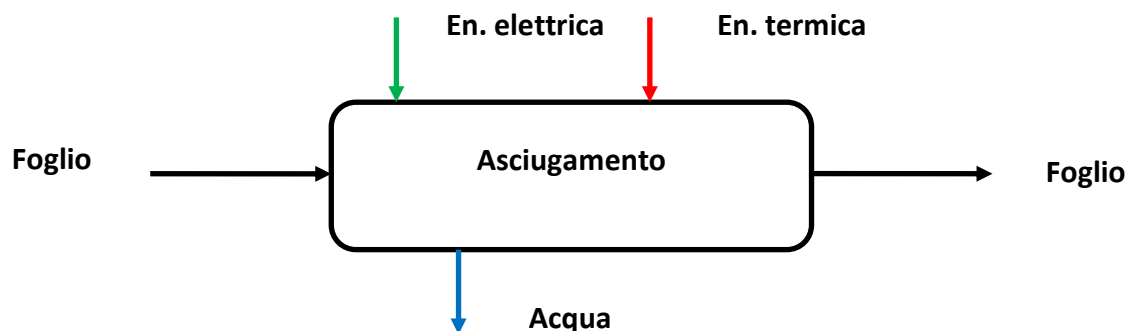
Dal grafico si evince che per un dato valore di umidità assoluta, definita come il rapporto tra la densità del vapore e la densità dell'aria secca, al variare della temperatura di bulbo secco (la temperatura misurata da un comune termometro) varia l'umidità relativa e quindi la quantità massima di vapore che la miscela può contenere. Questo aspetto è molto importante nel caso in questione, vista la funzione di "trasporto" dell'aria.

Presse: variabili fisiche che influenzano il processo

Condizioni della carta in ingresso

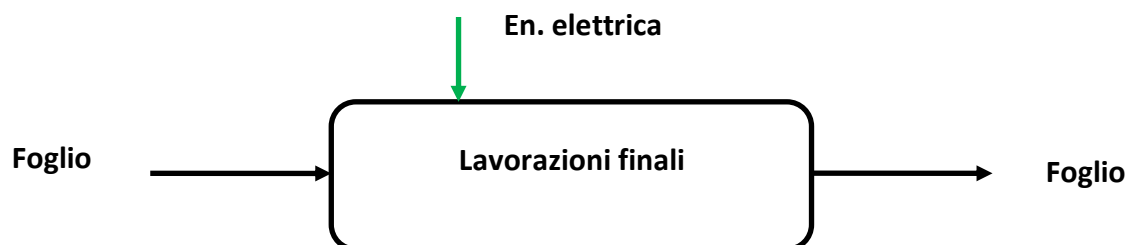
Tipo di prodotto in uscita

Condizioni dell'aria



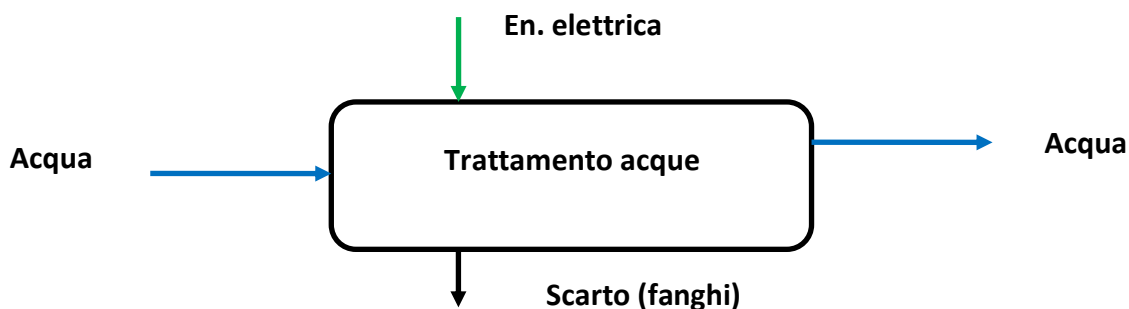
Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~50%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~95%
Acqua		
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~150÷300 kWh/t
Consumo energia termica		~1000÷2100 kWh/t

Per le lavorazioni finali, analogamente alla miscelazione, non si hanno alternative di rilievo.



Materia in ingresso		
Impasto	Grado di secco	~95%
Materia in uscita		
Impasto	Grado di secco	~95%
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~10÷40 kWh/t

Il trattamento acque avviene tramite l'applicazione di una o più tecniche descritte nel capitolo 2.



Materia in ingresso		
Acqua		
Materia in uscita		
Acqua		
Scarto (fanghi)		
Consumi di energia		
Consumo energia elettrica		~5÷10 kWh/t

3.2 BAT.

Si elencano ora le Best Available Technologies pubblicate sulle linee guida Assocarta per la compilazione delle diagnosi energetiche. Le tabelle fanno riferimento anche a situazioni specifiche, non necessariamente presenti in tutti gli stabilimenti (patinatura, re-pulping di materiale, uso di materiale come il black liquor, etc.). In alcune di esse è presente anche una colonna aggiuntiva, che ne evidenzia i limiti di applicabilità. A conclusione del capitolo alcuni disegni evidenziano in maniera schematica dove si localizzano gli interventi di efficientamento.

Per ridurre il consumo di combustibile e di energia nelle cartiere e fabbriche di pasta per carta, la BAT consiste nell'usare la tecnica a) e una combinazione delle altre tecniche riportate di seguito:

	Tecnica	Applicabilità
a	<p>Uso di un sistema di gestione dell'energia avente tutte le seguenti caratteristiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> i. valutazione del consumo e della produzione di energia complessivi della cartiera; ii. individuazione, quantificazione e ottimizzazione del potenziale di recupero dell'energia; iii. monitoraggio e protezione della condizione ottimizzata del consumo energetico. 	Generalmente applicabile.
b	Recupero dell'energia mediante incenerimento dei rifiuti e dei residui della produzione di pasta per carta e carta aventi	Applicabile solo se il riciclo o il riutilizzo dei

	contenuto organico e valore calorifico elevati.	rifiuti e dei residui della produzione di pasta per carta e carta a contenuto organico e valore calorifico elevati non è possibile.
c	Copertura della domanda di vapore ed energia dei processi produttivi per quanto possibile per mezzo della cogenerazione di calore ed energia (CHP) (vedi descrizione a fine tabella).	Applicabile a tutti i nuovi impianti e in caso di rifacimenti importanti dell'impianto di produzione di energia. L'applicabilità negli impianti esistenti può essere limitata dal layout della cartiera e dallo spazio disponibile.
d	Uso del calore in eccesso per essiccare la biomassa e i fanghi, per riscaldare l'acqua di alimentazione della caldaia e di processo, per riscaldare gli edifici ecc.	L'applicabilità di questa tecnica può essere limitata nei casi in cui le fonti di calore e gli edifici sono distanti.
e	Uso di termocompressori.	Applicabile agli impianti nuovi ed esistenti, per tutti i tipi di carta e per le patinatrici, a condizione che vi sia disponibilità di vapore a media pressione.
f	Isolamento delle condutture di vapore e condensato.	Generalmente applicabile.
g	Uso di sistemi sottovuoto per la disidratazione efficienti sotto il profilo energetico.	
h	Uso di motori, pompe e agitatori elettrici ad alta efficienza.	
i	Uso di inverter per ventilatori, compressori e pompe.	
j	Allineamento dei livelli di pressione del vapore con le esigenze reali.	
Descrizione Tecnica c: generazione simultanea di calore ed energia elettrica e/o meccanica in un unico processo, il cosiddetto impianto di cogenerazione di calore ed energia (CHP) Gli impianti CHP del settore della pasta per carta e della carta di norma fanno uso di turbine a vapore e/o a gas. La fattibilità economica (risparmi realizzabili e ammortamento) dipende essenzialmente dal costo dell'energia elettrica e dei combustibili.		

Consumo ed efficienza energetici

Per ridurre il consumo di energia termica (vapore) massimizzare il beneficio dei vettori energetici usati e ridurre il consumo di energia elettrica, la BAT prevede di applicare una combinazione delle tecniche riportate di seguito.

	Tecnica
a	Elevato contenuto solido secco della corteccia, per mezzo di presse o essiccazione efficienti.
b	Caldaie a vapore ad alta efficienza, per esempio gas reflui a basse temperature.
c	Sistemi di riscaldamento secondari efficienti.
d	Cicli chiusi, compreso l'impianto di sbiancamento ed elevata densità della pasta per carta (tecnica a consistenza media o alta).
f	Impianto di evaporazione ad alta efficienza e recupero del calore dei serbatoi per "dissolving pulp", per esempio con scrubber a sfiato.
h	Recupero e riutilizzo di correnti a bassa temperatura provenienti dagli effluenti e da altre fonti di calore di scarto per riscaldare gli edifici, l'acqua della caldaia e di processo.
i	Uso adeguato del calore e del condensato secondari.
j	Monitoraggio e controllo dei processi attraverso sistemi di controllo avanzati.
k	Ottimizzazione della rete integrata di scambiatori di calore.
l	Recupero del calore dai gas reflui delle caldaie di recupero fra l'ESP e il ventilatore.
m	Garantire una consistenza della pasta per carta più alta possibile in fase di vaglio e pulitura.
n	Uso di dispositivi di controllo della velocità di diversi grandi motori o uso di pompe sottovuoto efficienti e pompe, condotti e ventilatori di dimensioni adeguate e livelli ottimizzati dei serbatoi.

Per aumentare l'efficienza della generazione di energia, la BAT consiste nell'usare una combinazione delle tecniche riportate di seguito.

	Tecnica
a	Elevato contenuto solido secco nel liquor nero (aumenta l'efficienza della caldaia, la generazione di vapore e quindi la generazione di energia elettrica).
b	Pressione e temperatura elevate della caldaia di recupero nelle caldaie di recupero nuove la pressione può raggiungere almeno 100 bar e una temperatura di 510 °C.
c	Pressione del vapore in uscita nella turbina a contropressione più bassa possibile per quanto tecnicamente fattibile.
d	Turbina a condensazione per la produzione di energia dal vapore in eccesso.
e	Elevata efficienza della turbina.
f	Preriscaldamento dell'acqua di alimentazione a una temperatura vicina al punto di ebollizione.
g	Preriscaldamento dell'aria di combustione e del combustibile immesso nelle caldaie.

Al fine di ridurre il consumo di energia termica ed elettrica, la B.A.T. consiste nell'utilizzare una combinazione delle tecniche indicate di seguito.

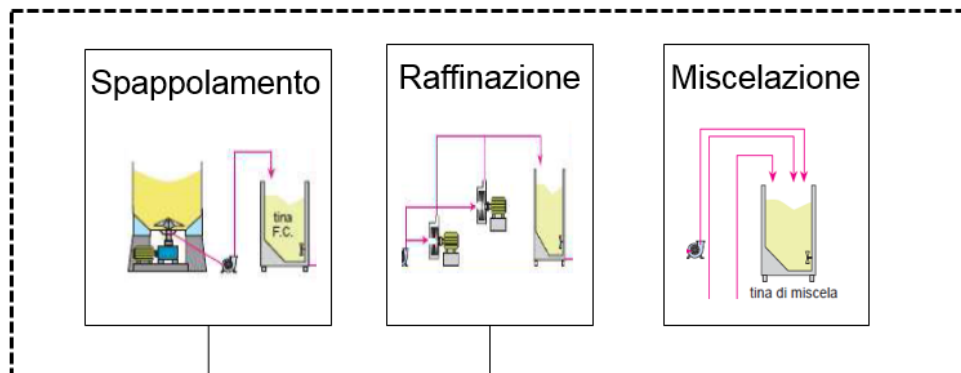
	Tecnica	Applicabilità
a	Utilizzo di raffinatori ad alta efficienza energetica.	Applicabile in caso di sostituzione, ricostruzione o aggiornamento di apparecchiature di processo.

b	Ampio recupero del calore secondario da raffinatori TMP e CTMP e riutilizzo del vapore recuperato per essiccare la carta o la pasta.	Generalmente applicabile.
c	Minimizzazione delle perdite di fibra utilizzando efficienti sistemi di raffinazione degli scarti (raffinatori secondari) efficienti.	
d	Installazione di apparecchiature di risparmio energetico, che comprendono processi di controllo automatizzato al posto di sistemi manuali.	
e	Riduzione dell'uso di acqua con il trattamento delle acque di processo interno e sistemi di ricircolo.	
f	Riduzione dell'uso diretto di vapore utilizzando una attenta integrazione di processi , ad esempio utilizzando la pinch analysis.	

La BAT intende ridurre il consumo di energia elettrica all'interno di cartiere RCF utilizzando una combinazione delle tecniche indicate di seguito

	Tecnica	Applicabilità
a	Elevata consistenza dello spappolamento per disintegrare la carta riciclata in fibre separate.	Generalmente applicabile per nuovi impianti e per gli impianti esistenti nel caso di una grande ristrutturazione.
b	Screening più efficienti con l'ottimizzazione del rotore, consentendo l'uso di apparecchiature più piccole con minore consumo energetico specifico.	
c	Risparmio energetico nella preparazione delle scorte con l'estrazione delle impurità il più presto possibile nel processo di re-pulping, utilizzando un numero minore e componenti ottimizzati della macchina limitando in tal modo il trattamento intensivo di energia delle fibre.	

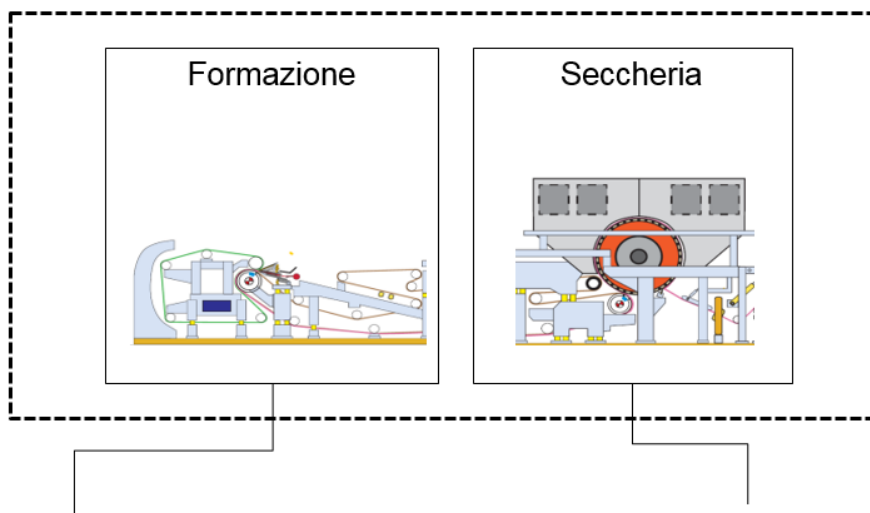
STOCK PREPARATION



- Inverter girante
- Sostituzione Girante

- Nuovo raffinatore più efficiente
- Sostituzione Guarniture Dischi

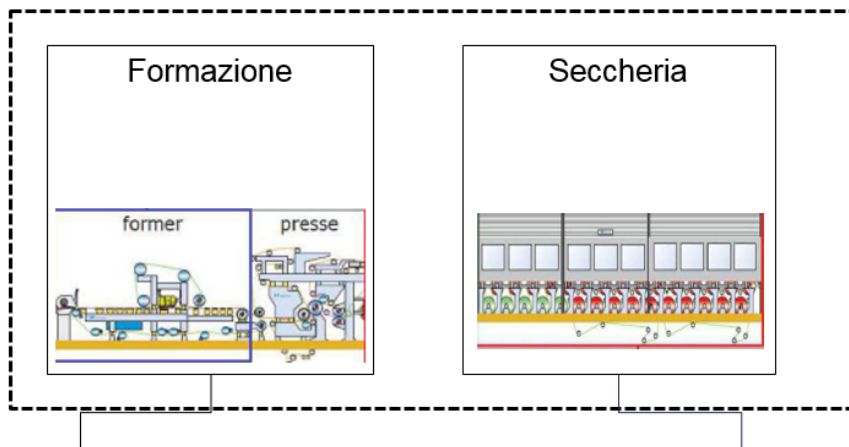
MACCHINA CONTINUA _ TISSUE



- Modifica geometria e materiali
Casse Aspiranti (Impianto Vuoto)
- Inverter Fan Pump

- Coibentazione Monolucido
- Modifica AirSystem
- Installazione recupero fumi Cappa Dry
- Sostituzione termocompressori
- Fumi CTe in cappa

MACCHINA CONTINUA _ CARTONCINO/CARTA GRAFICA

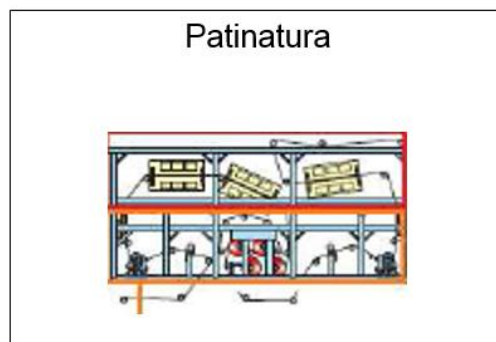


- Installazione di Shoe Press
- Sostituzione di Cilindri Formatori con Tavola Piana
- Modifica geometria e materiali Casse Aspiranti (Impianto Vuoto)
- Inverter Fan Pump/Vuoto

- Aumento n° Cilindri
- Casse Condizionatrici
- Implementazione Cilindri Forati Aspiranti
- Modifica Impianto Vapore (Sifoni, logica cascata - termocompressori, barre turbolenza)
- Recupero Calore

3

PATINATURA_ CARTA GRAFICA



- Sostituzione patinatrice
- Sostituzione cappa patinatrice IR con Gas e Aria Diffusa

Riferimenti: [2], [5], [6], [7], [10], [11], [12].

4. Impianti di generazione termica ed elettrica: analisi delle possibili combinazioni per la generazione termica ed elettrica e loro valutazione nell'ottica di implementazione delle BAT.

4.1 Premessa.

Al fine di valutare quantitativamente e qualitativamente le possibili soluzioni per l'apporto di energia in una cartiera, in modo poi da individuare le soluzioni ottimali, si prendono in considerazione due casi semplici e reperibili anche nella pratica: un impianto che produca cartone da RCF e uno che produca carta tissue da fibra vergine. Molto spesso nella realtà si ha a che fare con scenari misti, che sfruttano entrambe le materie prime, e un'ulteriore precisazione andrebbe fatta sul tipo di fibra vergine e sul tipo di carta riciclata; ipotizzando che la scelta di queste ultime sia la più idonea per ottenere in uscita quanto desiderato, si stima la taglia degli impianti fissando per entrambi una produttività annuale e un consumo di energia termica ed elettrica. Alla fine del capitolo per la produzione di cartone da RCF si suppone anche un impianto con produttività più bassa, per valutare una particolare tipologia di produzione di energia con taglie più piccole. Questo capitolo vuole dunque fornire una panoramica sugli impianti di generazione, evidenziando poi quei flussi in eccesso che non servono al processo principale. Va precisato che normalmente viene attuata anche una regolazione atta a livellare la differenza tra produzione e domanda di energia, qui si considera che le macchine installate lavorino al massimo della loro potenzialità, e il problema viene affrontato a prescindere da fattori di natura economica (incentivi, vendita di vettori energetici, etc.).

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Produzione annuale [t/y]	50000	50000
Energia termica specifica [kWh/t]	1200	1800
% energia termica specifica soddisfatta con il vapore	100%	80%
Energia termica totale associata al vapore [kWh]	60000000	72000000
Energia elettrica specifica [kWh/t]	400	900
Energia elettrica totale [kWh]	20000000	45000000
Ore di funzionamento annuale [h/y]	8400	8400
Energia termica totale associata alle cappe [kWh]	-	18000000

Per la produzione annuale si è scelto un valore plausibile nel panorama nazionale, analogamente per le ore di funzionamento annuali (corrispondenti a circa 350 giorni all'anno). Le energie specifiche (termica ed elettrica) sono state scelte in relazione al *BRef* cartario (*Best Available Techniques Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*) [3]. I valori riportati nel documento fanno riferimento ad un numero di stabilimenti europei campione.

Tipo di cartiera	Livello indicativo di consumo energia per il calore di processo (kWh/t)	Livello indicativo di consumo energia elettrica (kWh/t)
Carta grafica – (patinata e non patinata) (non integrata con produzione di cellulosa)	1300 ÷ 1700 (il livello superiore dell'intervallo si riferisce ai tipi di carta più patinata)	550 ÷ 800 (il livello superiore dell'intervallo include la patinatura e la raffinazione)
Tissue (non integrata con produzione di cellulosa)	1800 ÷ 2100	900 ÷ 1100
Carta speciale	Non applicabile (**) (**) A causa della grande diversità di prodotti, variando le composizioni delle materie prime ed i processi di fabbricazione, i valori di consumo energetico variano ampiamente tra le cartiere	

Tipo di cartiera	Livello indicativo di consumo energia per il calore di processo (kWh/t)	Livello indicativo di consumo energia elettrica (kWh/t)
RCF senza disinchiostrazione (carta per imballaggi, es. testliner e/o carta da onda)	1100 ÷ 1500	350 ÷ 450
RCF senza disinchiostrazione (cartone o cartoncino per astucci, patinato o non patinato)	1200 ÷ 1600	400 ÷ 500
RCF con disinchiostrazione (carta grafica, es. carta da giornale)	1000 ÷ 1800	900 ÷ 1300
RCF con disinchiostrazione (cartoncino per astucci)	1000 ÷ 1100	450 ÷ 550

Il fabbisogno di energia termica viene localizzato nella seccheria, supponendo che i riscaldamenti nelle altre fasi (di modesta entità) siano realizzati recuperando calore dai flussi principali, in linea con le BAT citate nel precedente capitolo. Per il caso 2 si considera che l'80% della richiesta termica venga soddisfatto con la condensazione del vapor saturo (cilindro monolucido) e la restante parte con la cessione del calore sensibile dei fumi della combustione del gas metano. Per il caso 1 invece si considera che la richiesta venga coperta interamente da una batteria di cilindri essiccatori. Successivamente quindi, per le varie soluzioni esposte, e limitatamente al caso 2, alla quota di gas necessaria per la produzione di energia elettrica e di vapore va aggiunta quella da utilizzare nelle cappe. Il riferimento è all'estremo inferiore dell'intervallo di riferimento (sia per l'energia elettrica che per quella termica, sia per il caso 1 che per il caso 2), supponendo quindi che i processi avvengano con l'adozione delle tecnologie più efficienti.

Si è già discusso sulla differenza tra l'utilizzo di vapore ad una certa pressione piuttosto che ad un'altra, ovvero di come l'alta pressione comporti una maggiore portata (in quanto il calore latente diminuisce col crescere della pressione, la "campana" nei diagrammi TS ed HS si restringe) e una maggior velocità di asciugamento. Si è detto anche dei motivi pratici e dei vantaggi nella gestione dell'impianto per i quali si prediligono le basse pressioni, a cui vanno aggiunti i motivi legati al rendimento di secondo principio. L'exergia associata allo sfruttamento di un vapore ad alta pressione è molto maggiore di quella di un vapore a bassa pressione, in virtù delle differenti temperature associate. A parità di effetto, considerando quindi le diverse soluzioni si può avere anche un indice di efficienza del processo in termini di secondo principio della termodinamica. Va fatta inoltre un'altra considerazione. Da un punto di vista fisico, il sistema carta-cilindro essiccatore (sia esso il monolucido o il componente singolo della batteria), può essere visto come uno scambiatore in controcorrente in cui l'acqua della carta in un primo momento si riscalda fino alla temperatura di vaporizzazione, in un secondo vaporizza a temperatura costante. Secondo le logiche della Pinch Analysis, risulta energeticamente conveniente sfruttare anche il sottoraffreddamento delle condense fino ad una certa temperatura: questa fase consentirebbe il riscaldamento della carta e dell'umidità associata, in seguito esse scambierebbero con vapore saturo a titolo progressivamente crescente (ricordando come sia più difficile essiccare mano a mano che la percentuale di umidità cala). Anche in questo caso subentrano motivi ingegneristici a limitare il ragionamento: le condense all'interno del cilindro sono dannose in quanto rallentano la rotazione accumulandosi in presenza di macchine continue lente, riducono lo scambio termico distribuendosi sulla superficie interna dei cilindri per forza centrifuga in presenza di macchine continue veloci.

Se si considerasse un ipotetico sottoraffreddamento fino a 110°C, al variare della pressione del vapor saturo, avremmo le seguenti possibili situazioni:

Pressione vapore [bar]	Temperatura vapore [°C]	Δh_{vap} (uscita a 110°C) [kJ/kg]	Portata vapore caso 1 [t/h]	Portata vapore caso 2 [t/h]
1,5	111	2232	12,00	14,40
2	120	2245	11,93	14,32
3	133	2264	11,83	14,20
4	144	2276	11,77	14,12
5	152	2286	11,72	14,06
6	159	2294	11,68	14,01
7	165	2301	11,64	13,97
8	170	2306	11,62	13,94
9	175	2311	11,59	13,91
10	180	2315	11,57	13,88

La quantità effettiva di vapore da produrre riportata in tabella si calcola con la seguente formula:

$$\dot{m}_{vap} [t/h] = \frac{\frac{Q_{vapore}}{t}}{(\Delta h_{vap} \cdot \eta_s)} \cdot f$$

Dove Q_{vapore} è l'energia termica che deve essere soddisfatta con il vapore in kWh annuali (kWh/y), t le ore di funzionamento annuali in ore all'anno (h/y), Δh_{vap} il salto entalpico a cui è sottoposto il vapore in seccheria (pari al calore latente o al calore latente più quello di sottoraffreddamento) in kJ/kg, η_s il rendimento dello scambiatore, f il fattore di conversione tra tonnellate orarie (t/h) e kilogrammi al secondo (kg/s).

Il fattore f di conversione della portata che permette di passare da kg/s in t/h è pari a 3,6:

$$\dot{m} [kg/s] = \dot{m} [t/h] \cdot 3,6$$

Il rendimento dello scambiatore invece è pari a:

$$\eta_{scambiatore} = 0,96$$

Con la stessa formula e gli stessi parametri termodinamici del vapore, ma considerando solo la condensazione e non il sottoraffreddamento, si ottiene invece:

Pressione vapore [bar]	Temperatura vapore [°C]	Δh_{vap} (calore latente) [kJ/kg]	Portata vapore caso 1 [t/h]	Portata vapore caso 2 [t/h]
1,5	111	2226	12,03	14,44
2	120	2201	12,17	14,60
3	133	2164	12,38	14,85
4	144	2133	12,56	15,07
5	152	2108	12,71	15,25
6	159	2086	12,84	15,41
7	165	2066	12,97	15,56
8	170	2047	13,09	15,70
9	175	2031	13,19	15,83
10	180	2015	13,29	15,95

Si approfondisce il caso di vapore saturo a 2 bar, ipotizzando il sottoraffreddamento fino a 110°C. Il flusso di gas associato alle cappe è:

$$\dot{m}_{gas\ cappe} = \frac{Q_{cappe}/t}{PCI_{gas}}$$

Con Q_{cappe} che è l'energia termica da soddisfare con le cappe in kWh/y, t il numero di ore di funzionamento all'anno h/y e PCI_{gas} il potere calorifico inferiore del gas metano.

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata di gas associata alle cappe [smc/s]	-	0,06

4.2 Impianti di generazione.

Le tipologie di impianti per la produzione di energia termica ed energia elettrica ad oggi sono rappresentati dalle seguenti categorie (o dall'interconnessione tra esse):

- turbine a gas;
- turbine a vapore;
- motori a combustione interna;
- generatori di vapore;
- cappe asciugatrici;
- impianti di cogenerazione.

Gli impianti che sfruttano turbine a gas (detti anche turbogas) sono costituiti da una sezione di compressione dell'aria idealmente isoentropica, aria che poi viene prima sottoposta ad un incremento del proprio contenuto entalpico tramite una combustione o una somministrazione di calore dall'esterno idealmente isobare, e poi fatta espandere in una turbina (sempre con condizioni idealmente isoentropiche) con produzione di lavoro meccanico all'albero convertibile in energia elettrica. Questa tipologia di impianto è semplice e presenta rendimenti relativamente stabili con la variazione del carico.

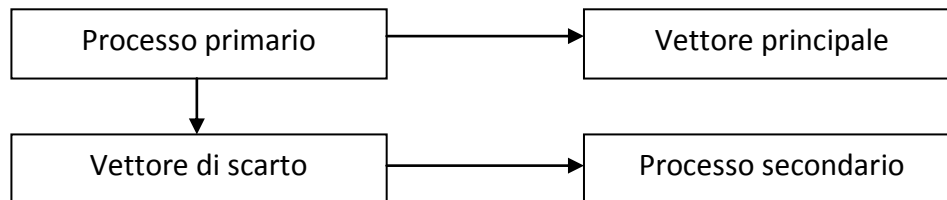
L'utilizzo di turbine a vapore presuppone l'utilizzo di un altro componente citato, ossia il generatore di vapore, rappresentato da una caldaia ove viene bruciato combustibile per riscaldare, far vaporizzare ed eventualmente surriscaldare una certa portata d'acqua. Il processo avviene sfruttando il calore radiante della fiamma e quello scambiato convettivamente dai fumi nel loro percorso verso il camino. Il vapore ai valori desiderati di temperatura e pressione che si forma (se non sfruttato direttamente nel processo) viene quindi fatto espandere in una turbina che analogamente a quelle a gas fornisce lavoro meccanico convertibile in energia elettrica. Gli impianti di questo tipo sono più complessi ed ingombranti e presentano una maggior inerzia, risultando meno adatti a situazioni con molte fermate e ripartenze.

Si hanno poi i motori alternativi a combustione interna, che sfruttano cicli a 2 o a 4 tempi come nei veicoli terrestri, alternando appunto fasi di aspirazione combustibile e comburente a fasi di combustione ed espansione, generando su di un albero un lavoro convertibile in energia elettrica. Vengono utilizzati per piccole potenze elettriche, sono caratterizzati da un'elasticità di funzionamento introvabile nelle altre tipologie. Presentano svantaggi in termini di manutenzione.

Le cappe asciugatrici molto semplicemente sono costituite da bruciatori che realizzano la combustione del combustibile con l'aria, i fumi in questo caso vengono convogliati verso il mezzo da asciugare grazie a ventilatori.

Gli impianti cogenerativi, come già accennato nell'introduzione, consentono la produzione sia di potenza elettrica che di potenza termica tramite la combinazione degli elementi visti sopra. Ad esempio un gruppo turbogas infatti fornisce in uscita (ad espansione avvenuta) un flusso di gas caldi con un contenuto entalpico ancora elevato che può essere sfruttato per la produzione di vapore in un generatore detto "a recupero". Questo vapore poi può essere sfruttato direttamente

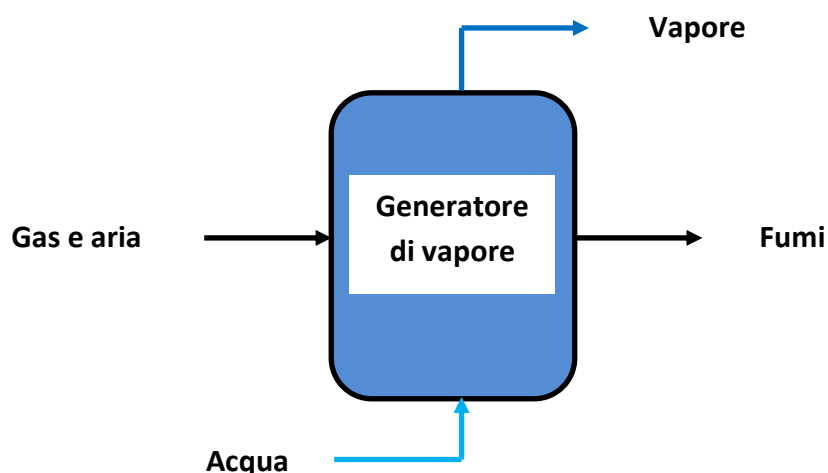
o può prestarsi ad espansione in una turbina a vapore (ottenendo un ciclo combinato gas-vapore). I motori a combustione interna oltre ai fumi, in uscita forniscono anche il flusso dell'acqua calda di raffreddamento. Il principio è quello di sfruttare un processo top e uno bottom di recupero per migliorare il rendimento globale, l'applicazione di esso è la base per l'ottimizzazione e l'individuazione delle Best Available Techniques.



4.3 Soluzione 1: impiego di un gruppo turbogas e di un generatore di vapore funzionanti separatamente.

La soluzione più semplice è la produzione separata di energia elettrica e di vapore. Mediante l'utilizzo di una turbina a gas ed un generatore di vapore si soddisfano le richieste. Si hanno vantaggi in termini di modulabilità, visto che di fatto si hanno due impianti separati, e quindi due gradi di libertà: la regolazione di un impianto non condiziona l'altro. Il consumo globale di gas metano come vedremo è alto. I flussi energetici in uscita dalle due centrali possono essere ulteriormente sfruttati. Ad esempio tramite scambiatori si può recuperare il calore sensibile dei fumi. A partire da ciò si sviluppa lo studio per altre configurazioni con gli elementi tecnologici disponibili nel panorama della produzione di energia.

Per il generatore di vapore si ha:



Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata vapore [t/h]	11,93	14,32

Temperatura vapore [°C]	120	120
Pressione vapore [bar]	2	2
Temperatura condense [°C]	110	110
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643	2643
PCI gas [kJ/smc]	35046	35046
Rendimento generatore di vapore	0,925	0,925
Portata gas [smc/s]	0,27	0,32

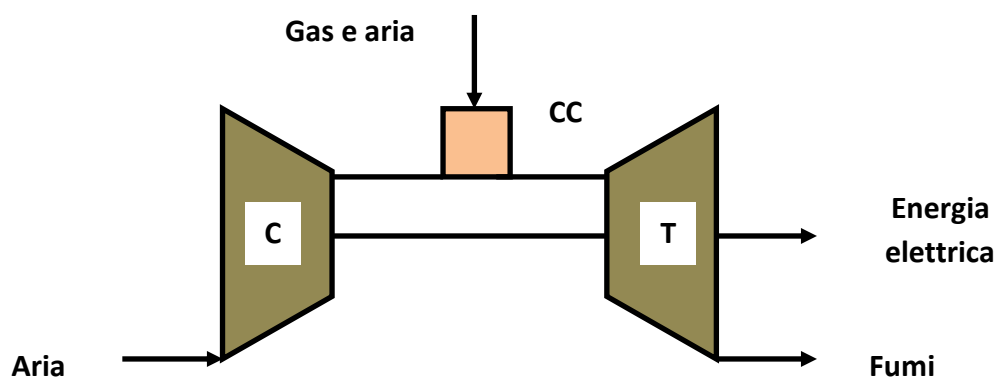
La portata, la temperatura, la pressione del vapore e la temperatura delle condense sono quelle viste sopra; il calore per produzione vapore è quello da fornire all'acqua (qui supposta a temperatura ambiente, in realtà si ha un ricircolo delle condense) per riscaldarla e per farla vaporizzare fino allo stato di vapore saturo secco, rappresenta dunque un salto entalpico tra due stati:

Stato	Entalpia
Acqua a 15°C, 1 bar	63 kJ/kg
Vapore saturo secco a 120°C, 2 bar	2706 kJ/kg

A partire da questi dati e dal valore del potere calorifico inferiore (anch'esso presente in tabella), si arriva a calcolare la portata di gas metano necessaria:

$$\dot{m}_{gas} [smc/s] = \frac{\frac{\dot{m}_{vapore}}{f} \cdot \Delta h_{riscaldamento}}{(PCI_{gas} \cdot \eta_{generatore})}$$

Passando al gruppo turbogas:



Per soddisfare le esigenze di elettricità con questo tipo di soluzione si attinge ad una macchina reperibile in commercio, con i dati di targa riportati su di un catalogo consultabile liberamente [8].

Dati	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Modello	W ind 501 Siemens	W SGT-100 Siemens

Grandezza	Caso 1	Caso 2
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357
Taglia turbina installata [kW]	3900	5400
Rendimento turbogas	0,29	0,31
PCI gas metano [kJ/smc]	35046	35046
Portata gas [smc/s]	0,38	0,50

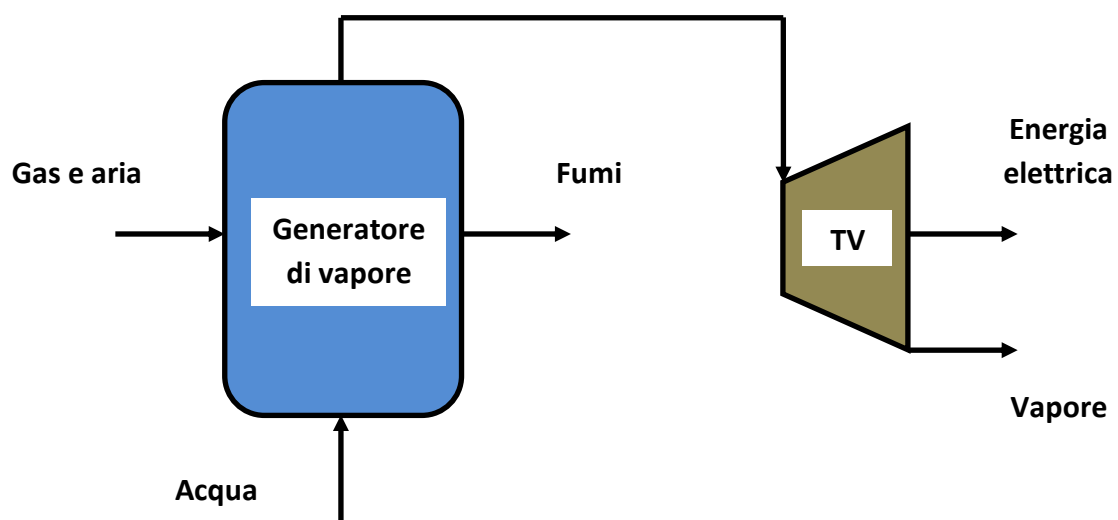
Il risultato complessivo della configurazione generatore più turbogas indipendenti è il seguente:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata gas totale (turbogas, generatore di vapore e cappe) [smc/s]	0,65	0,88
Surplus di energia elettrica annuale [kWh/y]	12760000	360000

Quanto esposto verrà poi confrontato con i risultati di altre soluzioni, il surplus di energia elettrica è dovuto alla taglia dei turbogas, che eccedono la potenza richiesta.

4.4 Soluzione 2: generatore di vapore e turbina a contropressione.

Un primo possibile scenario alternativo è rappresentato dall'installazione di un generatore di vapore con una turbina a contropressione in cascata, utile allo sviluppo di energia elettrica e all'invio del vapore in uscita alla seccheria.



Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata vapore [t/h]	11,93	14,32
Temperatura vapore turbina in uscita [°C]	120	120
Pressione vapore turbina in uscita [bar]	2	2
Temperatura condense [°C]	110	110
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643	2643
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357

A partire da questi dati si procede con il dimensionamento della turbina. Il generatore deve provvedere a fornire vapore (la portata è fissata, pari a quella necessaria in seccheria) nelle condizioni tali da garantire la produzione in turbina della potenza elettrica richiesta, che poi deve essere scaricato a 2 bar e 120°C per la fase di asciugamento.

Il salto entalpico a cui è sottoposto il vapore in turbina è dato da:

$$\Delta h_{reale} [kJ/kg] = \frac{\dot{W}_{el}}{(\dot{m}_{vap} \cdot \eta_{meccanico} \cdot \eta_{elettrico} \cdot \eta_{ausiliari} / f)}$$

\dot{W}_{el} e \dot{m}_{vap} sono la potenza elettrica richiesta e la portata vapore della tabella sopra, f è il solito fattore di conversione tra t/h e kg/s, i rendimenti invece sono:

Grandezza	Valore
Rendimento meccanico	0,925
Rendimento elettrico	0,94
Rendimento ausiliari	0,97

Otteniamo:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Salto entalpico reale [kJ/kg]	852	1597

Considerando il contenuto entalpico del fluido in uscita dalla turbina (supponendo che esso sia pari a quello del fluido in ingresso seccheria) e sommandolo al salto entalpico appena calcolato, si ottiene l'entalpia in ingresso turbina, ovvero quella in uscita dal generatore:

$$h_{in\ turbina} = h_{out\ turbina\ reale} + \Delta h_{reale}$$

Il salto entalpico isoentropico, ossia quello che avverrebbe in condizioni ideali, invece è dato da:

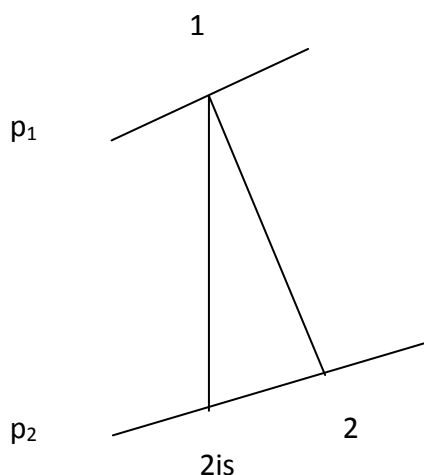
$$\Delta h_{isoentropico} = \Delta h_{reale} / \eta_{isoentropico}$$

E di conseguenza l'entalpia in uscita dalla turbina, in condizioni ideali sarebbe:

$$h_{out\ turbina\ isoentropico} = h_{in\ turbina} + \Delta h_{isoentropico}$$

Noto questo valore, unitamente alla conoscenza della pressione di scarico (la stessa di ingresso seccheria), si individua un punto sul piano termodinamico TS (o HS) corrispondente allo stato del vapore. Direttamente sul grafico, o sulle tabelle corrispondenti, si ricava il valore dell'entropia che è uguale a quello di ingresso turbina (visto che siamo nel caso isoentropico). Associando entalpia ed entropia di ingresso turbina, in maniera analoga si ricavano temperatura e pressione.

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine	Punto del grafico corrispondente
Entalpia ingresso turbina [kJ/kg]	3558	4303	1
Salto entalpico isoentropico [kJ/kg]	1032	1936	1-2is
Entalpia uscita turbina isoentropico [kJ/kg]	2525	2367	2is
Pressione ingresso turbina [bar]	50	Oltre 220	1
Temperatura ingresso turbina [°C]	552	Oltre 850	1



I valori di temperatura e pressione per entrambi i casi risultano troppi elevati, non realizzabili nella pratica (nel caso 2 si oltrepassano i valori critici). Una possibile soluzione al problema è quella di produrre una portata maggiore di vapore a pressione e temperatura più basse coprendo tutta la richiesta di energia elettrica. Le condizioni ipotizzate sono:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Pressione ingresso turbina [bar]	131	131

Temperatura ingresso turbina [°C]	530	530
Entalpia ingresso turbina [kJ/kg]	3417	3417
Pressione uscita turbina [bar]	2	2
Temperatura uscita turbina [°C]	120	120
Entalpia uscita turbina [kJ/kg]	2706	2706
Entalpia ingresso acqua nel generatore [kJ/kg]	63	63
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357
PCI gas metano [kJ/smc]	35046	35046

La portata di vapore prodotto e quella di gas necessario sono date da:

$$\dot{m}_{vap} = \frac{\dot{W}_{el}}{(h_{in\ turbina} - h_{out\ turbina}) \cdot \eta_{meccanico} \cdot \eta_{ausiliari} \cdot \eta_{elettrico}} \cdot f$$

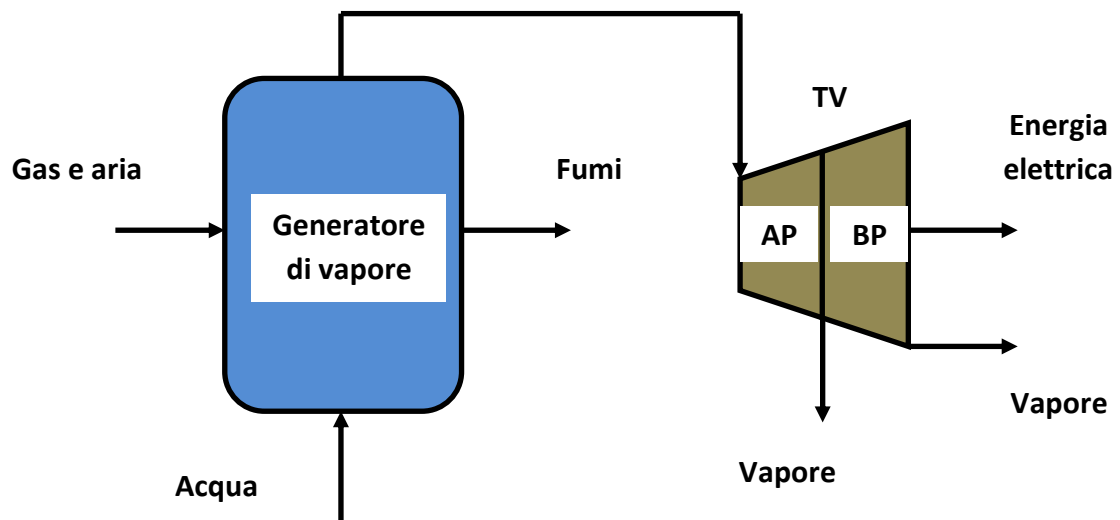
$$\dot{m}_{gas} [smc/s] = \frac{(h_{in\ turbina} - h_{in\ acqua}) \cdot (\dot{m}_{vap}/f)}{(PCI_{metano} \cdot \eta_{generatore})}$$

I simboli riportati nelle formule fanno riferimento alle grandezze definite in precedenza.

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata di vapore prodotto [t/h]	14,29	32,16
Portata di gas necessario (generatore di vapore e cappe) [smc/s]	0,41	0,98
Portata di vapore in surplus [t/h] (120°C, 2 bar)	2,36	17,84

4.5 Soluzione 3: generatore di vapore e turbina con spillamento di vapore.

La successiva possibilità è costituita dall'utilizzo di una turbina con spillamento di vapore. Dopo il generatore la portata di vapore totale espande in un primo stadio di alta pressione, quindi ne viene spillata la quota da destinare all'essiccamento mentre la restante parte espande in uno stadio di bassa pressione.



Il flusso di vapore spillato è fissato, in quanto dato dal fabbisogno in seccheria. Sottraendo dalla quota di energia elettrica da produrre il prodotto della quantità spillata per il salto entalpico a cui è sottoposta (con i soliti vari fattori che tengono conto di rendimenti e conversione) si giunge a calcolare il vapore totale da produrre.

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Pressione ingresso turbina [bar]	131	131
Temperatura ingresso turbina [°C]	530	530
Entalpia ingresso turbina [kJ/kg]	3417	3417
Pressione spillamento [bar]	2	2
Temperatura spillamento [°C]	120	120
Entalpia allo spillamento [kJ/kg]	2706	2706
Portata vapore spillato [t/h]	11,93	14,31
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357
Pressione scarico turbina [bar]	0,06	0,06
Temperatura scarico turbina [°C]	35	35
Entalpia uscita turbina [kJ/kg]	2564	2564
Entalpia ingresso acqua nel generatore [kJ/kg]	63	63
PCI gas metano [kJ/smc]	35046	35046

$\dot{m}_{vapore\ non\ spillato} [t/h]$

$$= \frac{\dot{W}_{el}}{\eta_{meccanico} \cdot \eta_{ausiliari} \cdot \eta_{elettrico}} - \frac{\dot{m}_{vapore\ spillato}}{f} \cdot (h_{in\ turbina} - h_{spillamento})$$

$$(h_{in\ turbina} - h_{out\ turbina}) \cdot f$$

$$\dot{m}_{vapore\ totale} [t/h] = \dot{m}_{vapore\ spillato} + \dot{m}_{vapore\ non\ spillato}$$

$$\dot{m}_{gas} [smc/s] = \frac{(h_{in\ turbina} - h_{in\ acqua}) \cdot (\dot{m}_{vap}/f)}{(PCI_{metano} \cdot \eta_{generatore})}$$

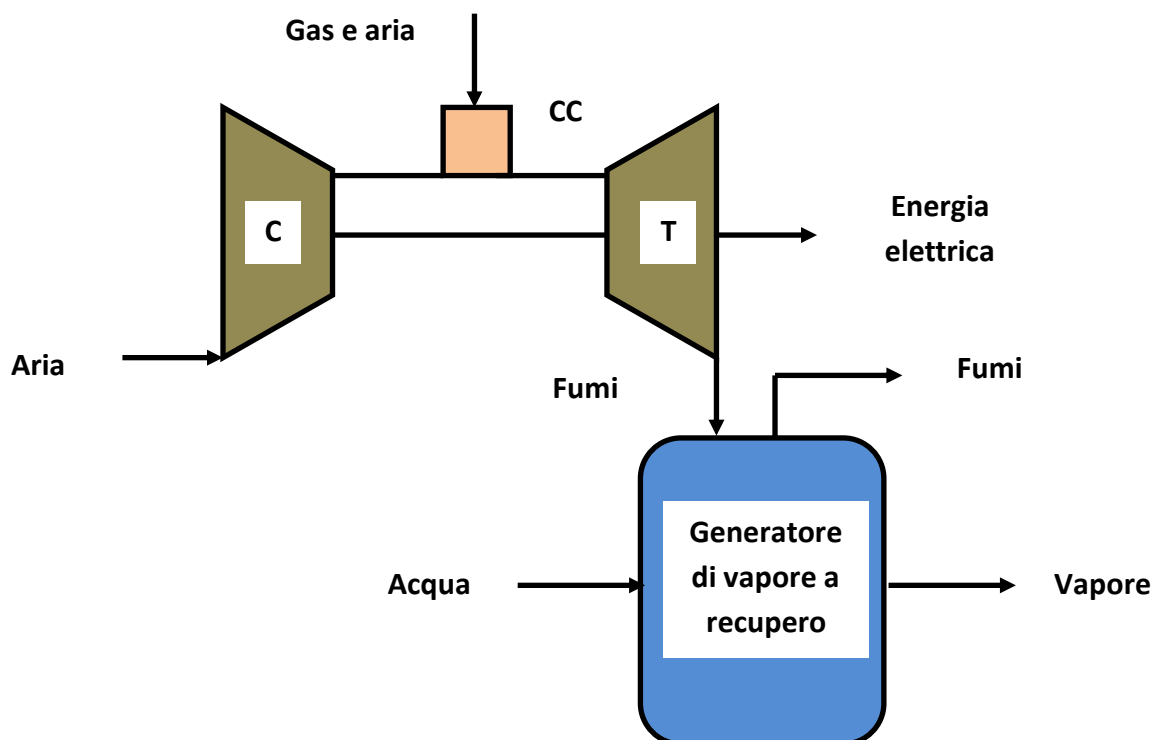
Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata di vapore non spillato [t/h]	1,97	14,87
Portata di vapore totale [t/h]	13,90	29,19
Portata di gas totale (generatore di vapore e cappe) [smc/s]	0,40	0,90

Vengono coperti entrambi i fabbisogni, ho una portata maggiore di condense, suddivise in due flussi: uno a 110°C e uno a 35°C.

4.6 Soluzione 4: turbogas con generatore di vapore a recupero.

L'installazione di un gruppo turbogas consente ulteriori sviluppi, oltre la prima soluzione vista. Come primo caso è descritto l'utilizzo di un generatore di vapore a recupero che sfrutti l'entalpia dei fumi uscenti dalla turbina a gas. Inizialmente si suppone di effettuare il dimensionamento a partire dal vettore elettrico, scegliendo le turbine viste nel primo caso, ed andando a rilevare quanto vapore si può produrre.

Dati	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Modello	W ind 501 Siemens	W SGT-100 Siemens



Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357
Potenza elettrica installata con il turbogas [kW]	3900	5400
Rendimento turbogas	0,29	0,31
Temperatura fumi ingresso gvr [°C]	560	531
Temperatura fumi uscita gvr [°C]	150	150
Calore specifico medio fumi [kJ/kg·°C]	1,06	1,06
Portata fumi [kg/s]	15,4	20,6
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643	2643
PCI gas metano	35046	35046

Il calore recuperabile (potenza termica) nel generatore di vapore a recupero, fissata la temperatura degli stessi al camino, è data da:

$$\dot{Q}_{fumi} = \dot{m}_{fumi} \cdot c_{p\ medio} \cdot (t_{fumi\ in\ gvr} - t_{fumi\ out\ gvr})$$

A questo punto si ricava anche la portata di vapore prodotto:

$$\dot{m}_{vapore\ prodotto} = \frac{\dot{Q}_{fumi} \cdot \eta_{generatore} \cdot \eta_{scambiatore}}{\Delta h_{produzione\ vapore}} \cdot f$$

E da un semplice bilancio di portate il vapore in difetto:

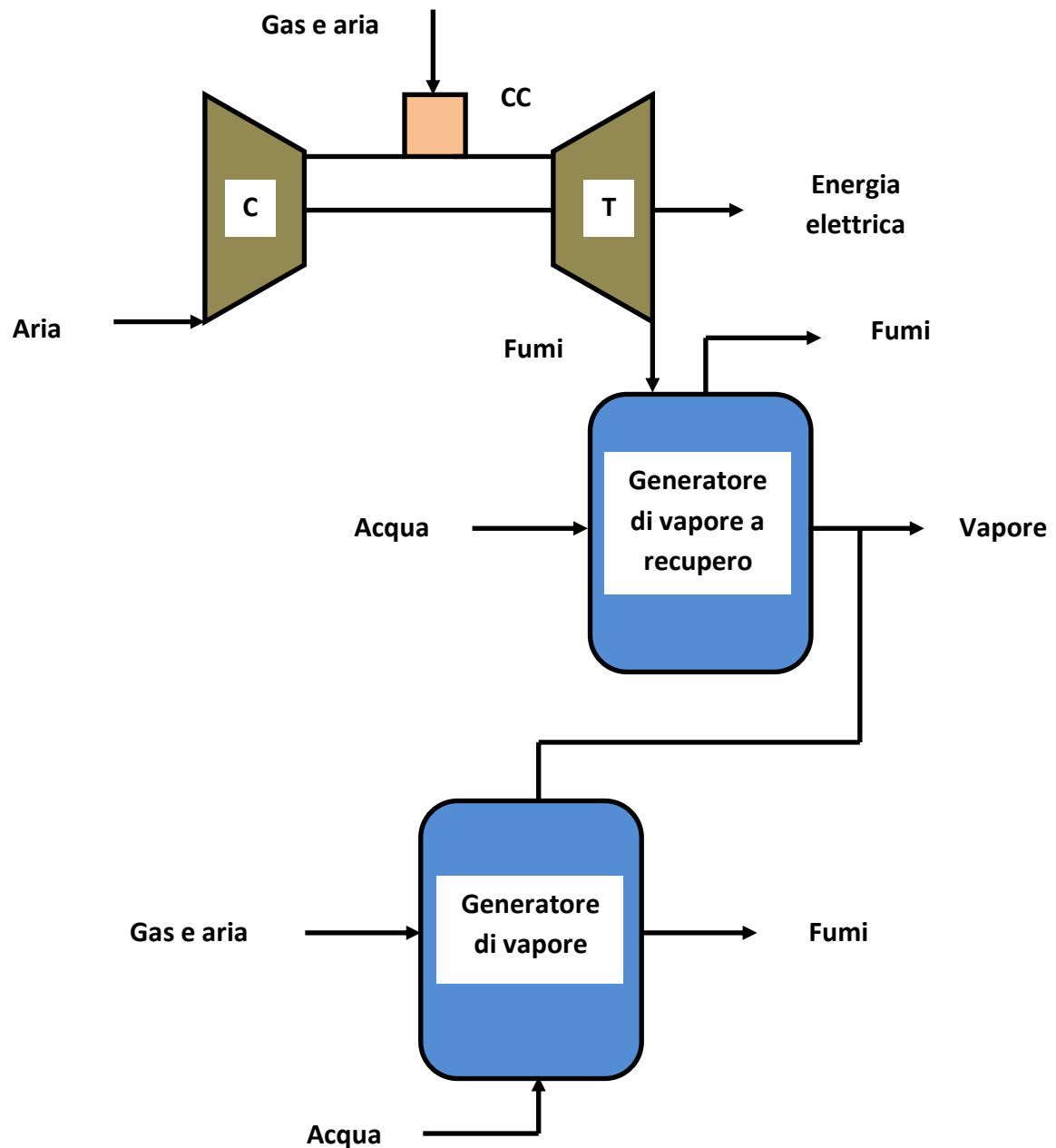
$$\dot{m}_{vapore\ mancante} = \dot{m}_{vapore\ richiesto} - \dot{m}_{vapore\ prodotto}$$

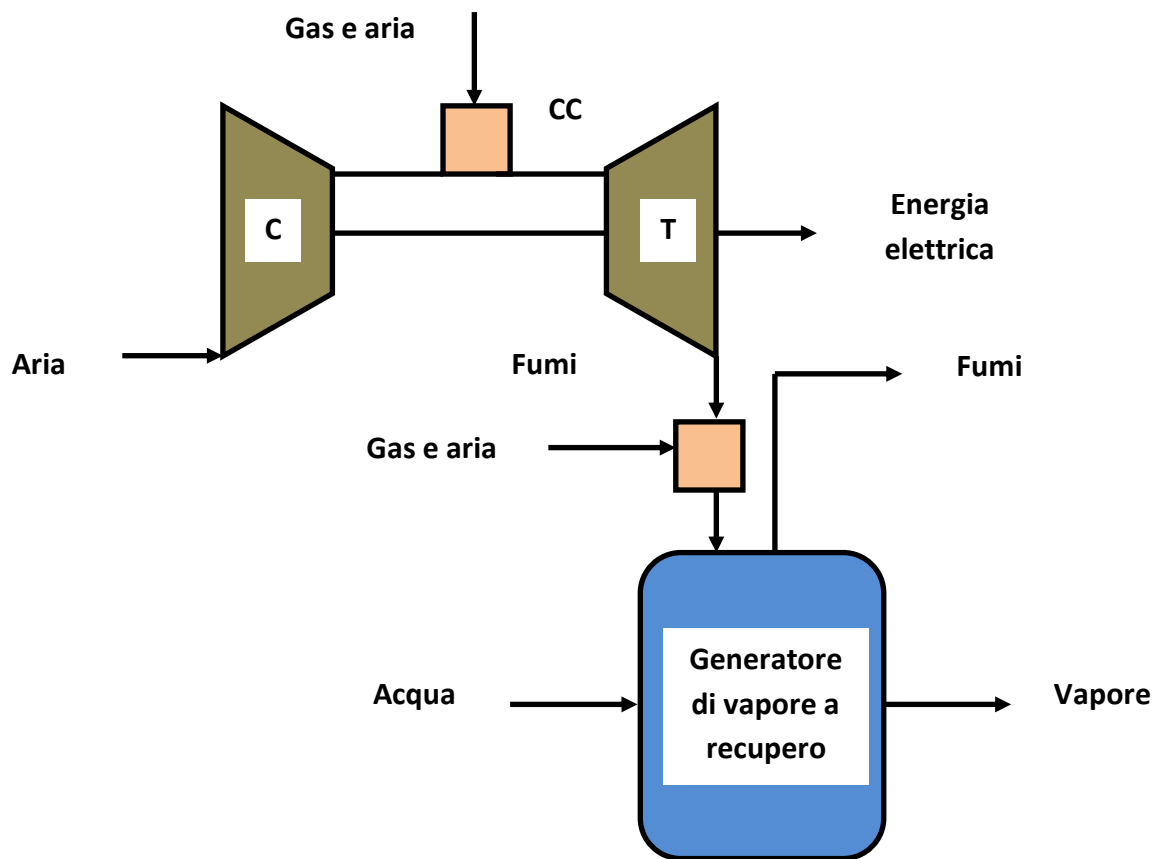
Infine la portata di gas metano:

$$\dot{m}_{gas} [smc/s] = \frac{\dot{W}_{turbogas}}{(PCI_{metano} \cdot \eta_{turbogas})}$$

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Potenza termica recuperata dai fumi [kW]	6693	8296
Portata vapore prodotto [t/h]	8,09	10,03
Portata vapore mancante [t/h]	3,84	4,28
Portata di gas necessario (generatore di vapore e cappe) [smc/s]	0,38	0,55

Risulta evidente il deficit di energia termica di questo schema impiantistico, risolvibile in due modi: o con una caldaia ausiliaria, analoga a quella della prima configurazione vista, o con l'inserimento di un postcombustore tra turbogas e generatore di vapore a recupero.





Le due alternative schematizzate sono praticamente uguali dal punto di vista del consumo complessivo di gas, le modalità di calcolo del quale sono analoghe a quelle già esposte sopra, sommando il flusso di gas necessario per la produzione del vapore addizionale al gas richiesto dal turbogas:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Portata di gas totale [smc/s]	0,47	0,65

Si ottiene un surplus di energia elettrica per entrambi i casi identico a quello della soluzione 1:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Surplus energia elettrica [kWh/y]	12760000	360000

Se invece il dimensionamento si realizza a partire dal vettore vapore (onde evitare l'utilizzo del postcombustore o di una caldaia separata), la scelta si orienta verso gruppi turbogas di taglia più

grande che produrranno parecchia energia elettrica in surplus, ma che consentiranno al contempo un flusso di gas esausti in grado di produrre tutto il vapore senza il ricorso ad aggiunte. Ecco un esempio:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Potenza elettrica richiesta [kW]	2381	5357
Potenza elettrica installata con il turbogas [kW]	6800	7900
Rendimento turbogas	0,31	0,30
Temperatura fumi ingresso gvr [°C]	466	542
Temperatura fumi uscita gvr [°C]	150	150
Calore specifico medio fumi [kJ/kg·°C]	1,07	1,07
Portata fumi [kg/s]	29,3	30,2
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643	2643
PCI gas metano	35046	35046

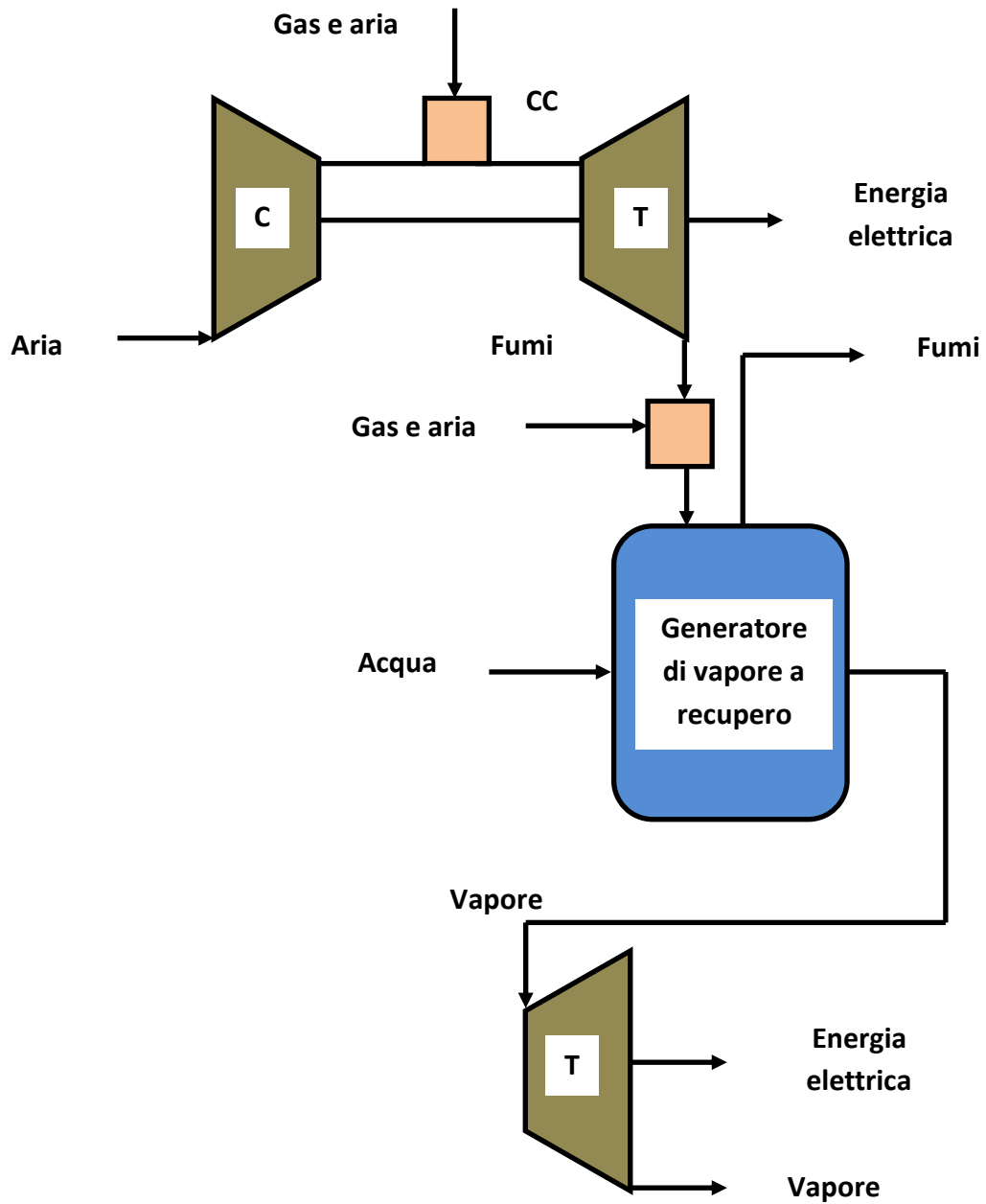
Applicando gli stessi procedimenti visti sopra si giunge ai seguenti risultati:

Grandezza	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine
Potenza termica recuperata dai fumi [kW]	9907	12667
Portata vapore prodotto [t/h]	11,98	15,32
Portata gas [smc/s]	0,61	0,79
Surplus di energia elettrica [kWh/y]	37120000	21360000

4.7 Soluzione 5: turbogas, generatore di vapore a recupero e turbina a vapore.

Un altro scenario che coinvolge le turbomacchine è costituito dall'associazione di un gruppo turbogas, un generatore di vapore a recupero e una turbina a vapore a contropressione. Nei casi esaminati, si potrebbe applicare in particolare al numero 2. Adottando un turbogas di taglia inferiore a quella utile al processo, si va poi a compensare con la potenza elettrica della turbina a vapore. Per il caso 1 è inutile questo studio poiché il turbogas impiegato, che è quello avente la taglia più piccola, fornisce una potenza elettrica comunque superiore alla somma delle utenze di stabilimento. La soluzione prevede l'utilizzo del postcombustore: un dimensionamento senza questo componente comporterebbe l'adozione di un gruppo turbogas con taglia superiore, di conseguenza l'impiego in contemporanea della turbina a vapore non avrebbe senso (otterremmo

un eccesso di energia elettrica già con il turbogas). Con la combinazione di questi componenti ottengo un dimensionamento ad hoc senza eccessi.



Grandezza	Caso 2: tissue da fibra vergine
Potenza elettrica richiesta [kW]	5357
Potenza elettrica installata turbogas [kW]	3900
Rendimento turbogas	0,29
PCI gas metano [smc/s]	35046
Portata vapore richiesta [t/h]	14,32
Pressione vapore uscita turbina a vapore [bar]	2
Temperatura vapore uscita turbina a vapore [°C]	120
Entalpia reale vapore uscita turbina a vapore [kJ/kg]	2706
Temperatura fumi in ingresso al gvr [°C]	560
Temperatura fumi in uscita dal gvr [°C]	150
Calore specifico medio fumi [kJ/kg·°C]	1,06

Il consumo di gas del turbogas si calcola immediatamente con le solite formule. La potenza elettrica che deve essere fornita dalla turbina a vapore è data dalla differenza tra quella richiesta e quella installata con il turbogas:

$$\dot{W}_{el\ tv} = \dot{W}_{el\ richiesta} - \dot{W}_{el\ turbogas}$$

Il salto entalpico reale della turbina a vapore è dato da:

$$\Delta h_{reale} = \frac{\dot{W}_{el\ tv}}{(\dot{m}_{vap\ voluto} \cdot \eta_{meccanico} \cdot \eta_{ausiliari} \cdot \eta_{elettrico})}$$

E di conseguenza l'entalpia in ingresso alla turbina a vapore:

$$h_{in\ turbina} = h_{out\ turbina} + \Delta h_{reale}$$

Il salto entalpico isoentropico, l'entalpia isoentropica in uscita dalla turbina:

$$\Delta h_{isoentropico} = \frac{\Delta h_{reale}}{\eta_{isoentropico}}$$

$$h_{out\ isoentropica} = h_{in\ turbina} - \Delta h_{isoentropico}$$

E con il medesimo ragionamento svolto in precedenza per una turbina a contropressione si ottengono le condizioni del vapore in ingresso.

La potenza termica dei fumi è:

$$\dot{Q}_{fumi} = \dot{m}_{fumi} \cdot c_{p\ medio} \cdot (t_{fumi\ in\ gvr} - t_{fumi\ out\ gvr})$$

La potenza termica di cui necessita il vapore è:

$$\dot{Q}_{vapore} = \frac{(h_{vapore \text{ in turbina}} - h_{in \text{ acqua}}) \cdot \dot{m}_{vapore \text{ voluto}}}{\eta_{scambiatore}}$$

Quindi la quota di calore di competenza del postcombustore è:

$$\dot{Q}_{postcombustore} = \dot{Q}_{vapore} - \dot{Q}_{fumi}$$

E il gas consumato dal postcombustore:

$$\dot{m}_{postcombustore} = \frac{\dot{Q}_{postcombustore}}{PCI_{gas \text{ metano}} \cdot \eta_{generatore}}$$

E quindi il gas consumato in totale:

$$\dot{m}_{totale} = \dot{m}_{turbogas} + \dot{m}_{postcombustore}$$

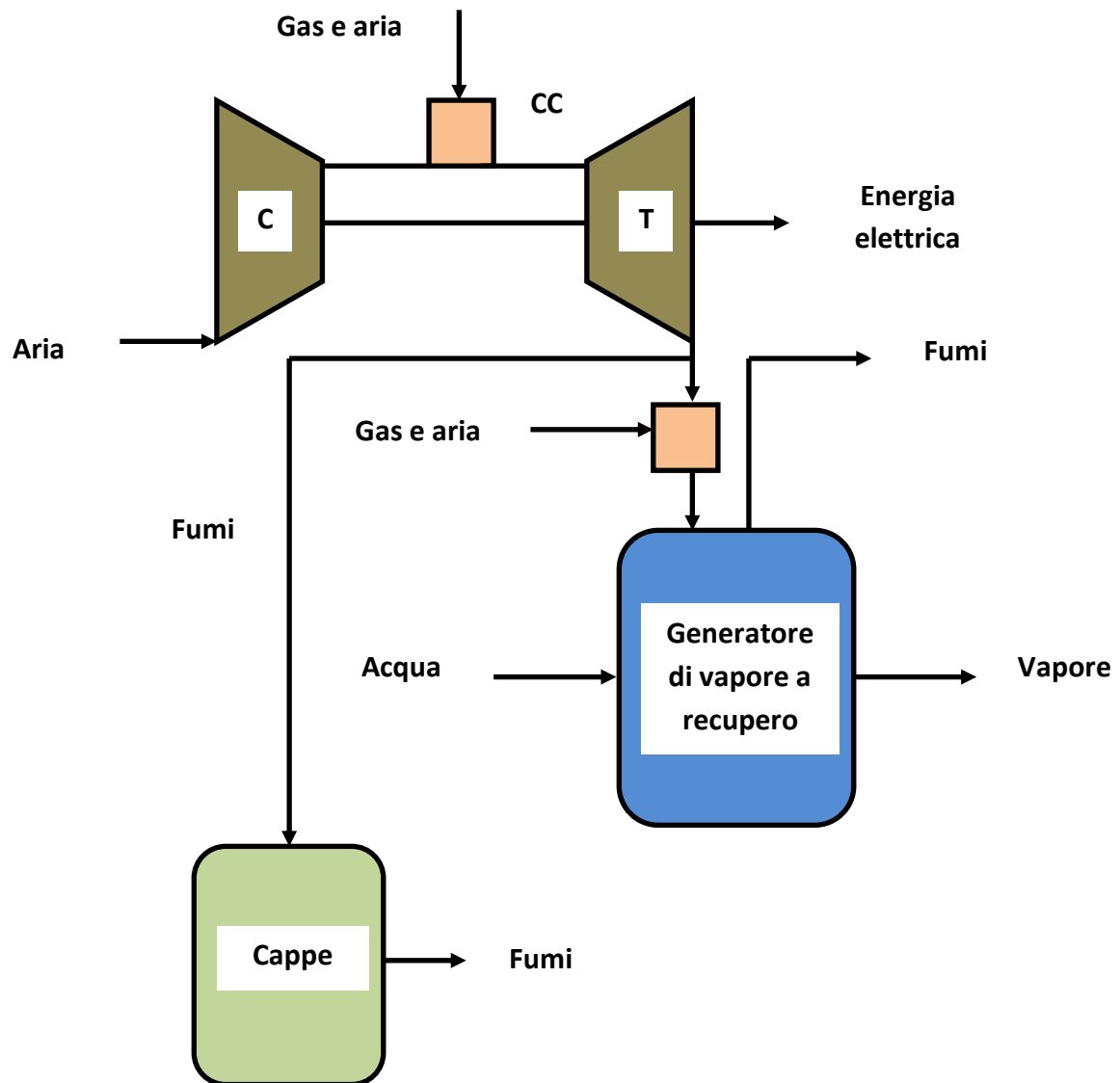
Il tutto è riassunto in tabella:

Grandezza	Caso 2: tissue da fibra vergine
Consumo gas turbogas [smc/s]	0,38
Potenza elettrica turbina a vapore [kW]	1457
Salto entalpico reale turbina a vapore [kJ/kg]	434
Entalpia ingresso turbina [kJ/kg]	3140
Salto entalpico isoentropico turbina a vapore [kJ/kg]	526
Entalpia isoentropica uscita turbina [kJ/kg]	2614
Pressione ingresso turbina [bar]	25,4
Temperatura ingresso turbina [°C]	356
Potenza termica fumi [kW]	6693
Potenza termica vapore [kW]	12749
Potenza termica postcombustore [kW]	6056
Consumo gas postcombustore [smc/s]	0,19
Consumo gas totale [smc/s]	0,63

Ovviamente è possibile utilizzare anche una turbina con spillamento, ma visto che in questo caso la richiesta di potenza elettrica viene completamente soddisfatta e nel dimensionamento della turbina a vapore non si ottengono parametri termodinamici proibitivi, non si ritiene di particolare interesse questo approfondimento ulteriore.

Ci possono essere anche altre soluzioni, come vedremo infatti il raffreddamento dei fumi del turbogas può essere sfruttato anche per le cappe asciugatrici. Tutto ovviamente dipende dal tipo di stabilimento: la presenza nello stesso sito di una filiera di lavorazione secondaria che necessiti di energia elettrica ulteriore affiancata alla cartiera, può comportare l'installazione di un gruppo con turbina a gas i cui fumi riescano a soddisfare ampiamente la produzione di vapore con un

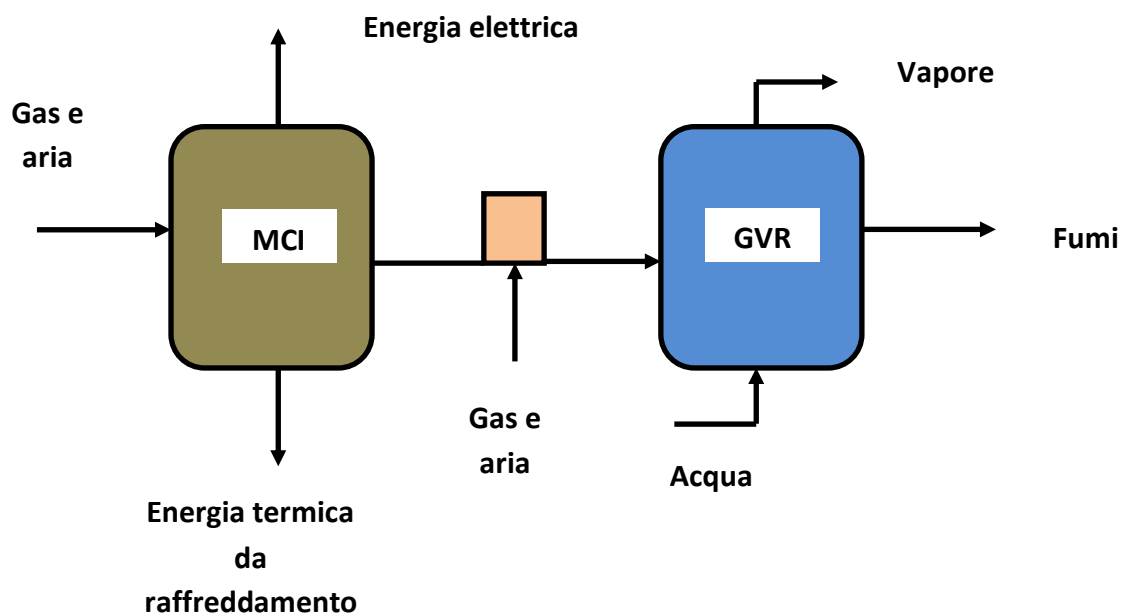
generatore a recupero e al tempo stesso asservire anche le cappe. Nel capitolo 6 si cercherà di affrontare il problema opposto: per una data soluzione impiantistica scelta verranno esposte alcune possibilità per sfruttare i flussi energetici secondari.



4.7 Soluzione 6: motore a combustione interna con generatore di vapore a recupero.

Per completare il quadro delle varie alternative si riporta anche il caso di un motore a combustione interna, applicato ad una realtà cartaria di taglia più piccola. Si suppone infatti di avere uno stabilimento che produca cartone da RCF, esattamente come nel caso 1, ma che la produttività annuale di questo sia dimezzata rispetto a tale caso. Anche qui inizialmente si dimensiona il motore sulla base del consumo elettrico, valutando l'entità dell'energia da fornire a parte (postcombustore o caldaia separata).

Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Produzione annuale [t/y]	25000
Energia termica specifica [kWh/t]	1200
% energia termica specifica soddisfatta con il vapore	1
Energia termica totale associata al vapore [kWh]	30000000
Energia elettrica specifica [kWh/t]	400
Energia elettrica totale [kWh]	10000000
Ore di funzionamento annuale [h/y]	8400
Energia termica totale associata alle cappe [kWh]	-



Con i soliti riferimenti al BRef, analogamente a prima si calcola la portata di vapore da alimentare in seccheria, potenza termica da fornire tramite il postcombustore e consumi di gas (ci si riferisce anche qui a macchine i cui dati sono consultabili liberamente su internet [9]):

Dati	Caso 3: cartone da RCF
Modello	MWM TCG 2020 V12

Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Potenza richiesta [kW]	1190
Potenza installata [kW]	1200
Portata vapore richiesta [t/h]	5,96
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643

Potenza termica fumi [kJ/kg]	499
Potenza termica postcombustore [kJ/kg]	4236
PCI gas metano [kJ/smc]	35046
Portata gas motore a combustione interna [smc/s]	0,07
Portata gas totale [smc/s]	0,20
Surplus energia elettrica [kWh/y]	80000

Se invece il dimensionamento è calibrato sul vettore vapore, si vuole continuare ad optare per i motori a combustione interna ed evitare il ricorso a meccanismi ausiliari, è necessaria l'installazione di più unità. I calcoli sono analoghi a quanto visto sopra.

Dati	Caso 3: cartone da RCF
Modello	MWM TCG 2020 V20

Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Potenza richiesta [kW]	1190
Potenza installata [kW]	12000
Portata vapore richiesta [t/h]	5,96
Calore per produzione vapore [kJ/kg]	2643
Potenza termica fumi [kJ/kg]	5075
Potenza termica postcombustore [kJ/kg]	-
PCI gas metano [kJ/smc]	35046
Portata gas motore a combustione interna [smc/s]	0,76
Portata gas totale [smc/s]	0,76
Surplus energia elettrica [kWh/y]	90800000

La presenza di un postcombustore, rende meno rigido il sistema ed è di uso comune al fine di svincolare la produzione di un vettore energetico dall'altro. Questo agevola le procedure da affrontare in caso di variazione delle condizioni di funzionamento. Osservando i consumi, non risulta conveniente eccedere nella taglia di una macchina. La caratteristica intrinseca di questa tipologia di motori è quella di cedere una buona parte del calore di processo al circuito di raffreddamento anziché tutto ai fumi, questo fa sì che la differenza nei consumi di una soluzione tradizionale non cogenerativa rispetto ad una soluzione cogenerativa sia minima. Con calcoli del tutto simili a quelli visti per questa soluzione e per la soluzione 1, si ricava il consumo di combustibile per una soluzione a generazione separata di energia elettrica e vapore.

Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Portata di gas totale [smc/s]	0,22

Questa voce è stata riportata a margine per poter fornire un parametro di confronto tra una situazione tradizionale ed una ottimizzata. In realtà, il caso di motori alternativi a combustione interna è interessante per la presenza di un flusso di energia termica, e si è comunque voluto valutarne l'efficienza a prescindere dalla taglia.

4.8 Riepilogo.

La tabella seguente mette in evidenza i risultati ottenuti per le soluzioni descritte sopra, in termini di consumi e di flussi eccedenti la richiesta. Si introduce un indice che riferisce l'energia utile sfruttata nel processo (somma dei consumi termici ed elettrici) all'energia totale immessa nell'impianto con il combustibile:

$$i = \frac{Q + W [kWh/y]}{m_{gas} \cdot PCI_{gas} [kWh/y]}$$

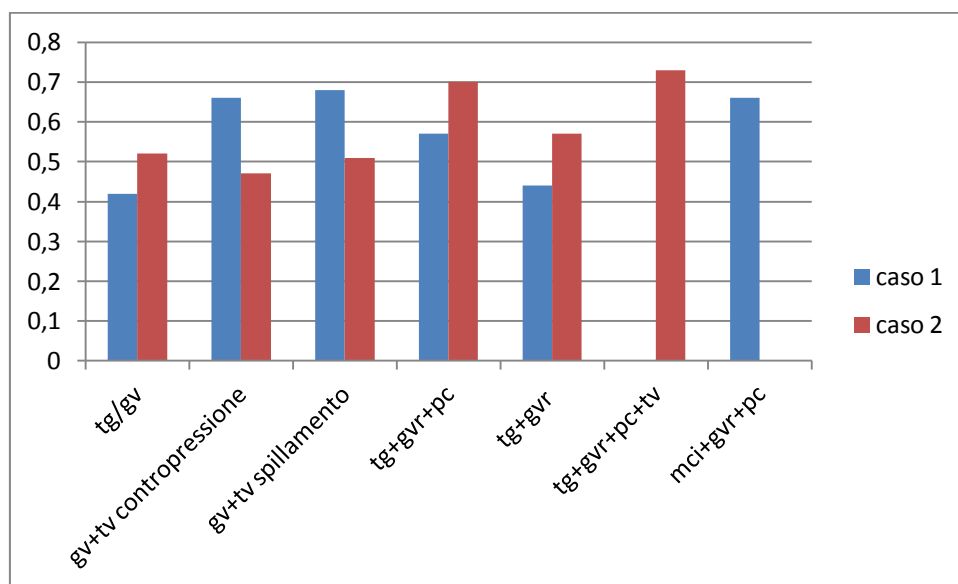
Soluzione	Parametro	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: tissue da fibra vergine	Indicatore i
1: turbogas+ generatore di vapore separati	Consumo [smc/s]	0,66	0,89	Caso 1: 0,42 Caso 2: 0,52
	Flusso in eccesso: energia elettrica [kWh/y]	12760000	360000	
	Flusso in eccesso: energia termica contenuta nei fumi [kg/s;°C]	15,4 ; 560	20,6 ; 531	
2: turbina a vapore a contropressione	Consumo [smc/s]	0,41	0,98	Caso 1: 0,66 Caso 2: 0,47
	Flusso in eccesso: energia termica (vapore a 2 bar, 120°C) [t/h]	2,36	17,84	
3: turbina a vapore con spillamento	Consumo [smc/s]	0,40	0,90	Caso 1: 0,68 Caso 2: 0,51
	Flusso in eccesso: nessuno	-	-	
4.1: turbogas+gvr e postcombustore	Consumo [smc/s]	0,47	0,66	Caso 1: 0,57 Caso 2: 0,70
	Flusso in eccesso:	12760000	360000	

	energia elettrica [kWh/y]			
4.2: turbogas (sovradimensionato)+gvr	Consumo [smc/s]	0,61	0,80	Caso 1: 0,44 Caso 2: 0,57
	Flusso in eccesso: energia elettrica [kWh/y]	37120000	21360000	
5: turbogas+gvr+turbina a vapore con postcombustore	Consumo [smc/s]	-	0,63	Caso 2: 0,73
	Flusso in eccesso	-	-	

Soluzione	Parametro	Caso 3: cartone da RCF	Indice i
6.1: motore a combustione interna+gvr con postcombustore	Consumo [smc/s]	0,207	Caso 3: 0,66
	Flusso in eccesso: energia elettrica [kWh/y]	80000	
	Flusso in eccesso: energia termica, acqua ad 85°C [kWh]	5107200	
6.2: motore a combustione interna (sovradimensionato)+gvr	Consumo [smc/s]	0,76	Caso 3: 0,36
	Flusso in eccesso: energia elettrica [kWh/y]	90800000	
	Flusso in eccesso: energia termica, acqua ad 85°C [kWh/y]	50384880	
6.2: motore a combustione interna (sovradimensionato)+gvr	Consumo [smc/s]	0,22	Caso 3: 0,64
	Flusso in eccesso: energia elettrica [kWh/y]	80000	
	Flusso in eccesso: energia termica, acqua ad 85°C [kWh/y]	5107200	
	Flusso in eccesso: energia termica contenuta nei fumi [kg/s;°C]	1,77 ; 419	

Osservando gli indicatori, si osserva che la soluzione che prevede il recupero di energia da un turbogas tramite un generatore di vapore a recupero (sia con un successivo sfruttamento diretto di vapore, sia con la presenza di una turbina a vapore in cascata) si adatta bene sia al caso 1 che al caso 2. Le soluzioni con turbina a vapore si dimostrano vantaggiose nel caso 1, ma peggiorano nelle situazioni con taglie maggiori. Un motore a combustione interna con generatore di vapore a recupero e postcombustore applicato al caso di piccole taglie presenta un indice elevato, a testimonianza della validità di questa configurazione. Da un punto di vista qualitativo come si è già accennato, il postcombustore fornisce vantaggi in termini di modulabilità, permettendo di regolare la fornitura con una semplice accensione o un semplice spegnimento dei bruciatori ausiliari. Impianti funzionanti con regolarità nel corso dell'anno, ovvero poche fermate e ripartenze, consentono la fruizione di macchine con fasi di entrata a regime lunghe. La produzione di energia elettrica con turbine a vapore si associa in questa categoria, infatti limitare i transitori permette di marciare a regime e al massimo rendimento. Le situazioni con avviamenti e fermate frequenti si accoppiano invece preferibilmente a sistemi con minor inerzia, quali i turbogas o i motori a combustione interna.

Grafico 7 - Confronto fra le varie soluzioni



Riferimenti: [3], [4], [5], [8], [9].

5. Un esempio concreto di evoluzione degli impianti cogenerativi: lo stabilimento Lucart S.p.A. di Castelnuovo di Garfagnana.

5.1 Breve descrizione del processo produttivo.

L'attività dello stabilimento Lucart di Castelnuovo di Garfagnana consiste nella produzione di carta tissue e nella sua trasformazione in vari prodotti per uso igienico-sanitario pronti alla vendita (carta igienica, rotoli per cucina, rotoloni industriali), utilizzando come materia prima esclusivamente fibra vergine (cellulosa). Presso lo stabilimento di Castelnuovo di Garfagnana è in attività una macchina continua per la produzione di carta tissue (PM11) e un reparto di trasformazione (converting), dove le bobine vengono sottoposte a trasformazione in prodotti finiti pronti alla vendita.

5.1.1 Ingresso materia prima.

Questa prima fase consiste nel ricevimento della materia prima (balle di cellulosa vergine) trasportata da automezzi. La cellulosa vergine all'arrivo in stabilimento viene pesata, e dopo essere stata visionata dal magazziniere, viene depositata e raggruppata per tipologia nel "magazzino cellulosa", coperto e riparato dagli agenti atmosferici, antistante il reparto di preparazione impasti, ove sono ubicati gli spappolatori. Le singole balle di cellulosa (costituite da più fogli di cellulosa legati insieme per un peso totale di 200-250 kg) in genere sono spedite dal fornitore in unità-balloni composte da 6 o 8 balle legate tra loro. Le operazioni di scarico delle materie prime e del loro immagazzinamento sono effettuati per mezzo di carrelli elevatori.

5.1.2 Spappolamento della cellulosa.

Dal magazzino le balle dei diversi tipi di cellulosa, prelevate in funzione della necessità di produzione e delle caratteristiche del tissue prodotto, dopo l'asportazione dei fili di ferro di legatura dei balloni, vengono trasportate per mezzo di carrelli elevatori sui nastri di caricamento del reparto di preparazione impasti: ogni nastro è caricato con un solo tipo di cellulosa. Dai vari nastri le singole balle vengono prelevate automaticamente da una navetta secondo la ricetta impostata dalla produzione e i livelli delle tine di stoccaggio, attraversano la stazione dell'operatore che provvede a togliere i fili di legatura delle singole balle e tramite nastri trasportatori confluiscono nello spappolatore (o pulper), in cui avviene la preparazione dell'impasto. L'impianto è dotato di 3 pulpers nei quali avviene lo spappolamento della materia prima con acqua di riciclo proveniente dal flottatore di processo (raccolta in opportuni serbatoi ubicati sopra il pulper) e con l'aggiunta di prodotti chimici per ottenere una dispersione fibrosa omogenea: un pulper è utilizzato per lo spappolamento delle due fibre principali (fibra corta e fibra lunga), mentre gli altri due pulper sono utilizzati per lo spappolamento degli sfridi di lavorazione della produzione-tissue e del reparto converting. L'aggiunta dell'acqua e dei prodotti chimici avviene in automatico in base alle ricette di produzione: in particolare nel pulper principale l'acqua viene aggiunta alle balle di cellulosa in modo da garantire, in funzione del peso della cellulosa caricata, una concentrazione dell'impasto pari a 12-13 %. I pulper sono tine ad asse

verticale in cui una girante posta sul fondo provvede alla completa apertura del impasto fibroso, fornendo l'energia di spappolamento necessaria per la disintegrazione delle presse che avviene sia per azione meccanica che per mutuo sfregamento fra le fibre. Ultimato lo spappolamento e previa ulteriore diluizione a 5-6%, l'impasto fibroso viene scaricato e inviato nelle tine di stoccaggio.

5.1.3 Stoccaggio impasto.

Le cellulose pulperate vengono trasferite tramite pompa e separatamente (fibra corta, fibra lunga, chemitermomeccaniche (CTMP, sfridi di lavorazione, etc.) dal pulper nelle tine di stoccaggio tenute in movimento da un agitatore ad asse verticale e controllate con una misurazione di livello che consente di verificare quando effettuare una successiva spappolata: l'impasto di cellulosa contenuto nelle tine di stoccaggio è pronto per essere sottoposto ad un trattamento di epurazione e successivamente inviato nelle tre tine di miscela.

5.1.4 Prima fase di epurazione dell'impasto.

L'impasto può contenere impurità di vario genere (sassi, legno, plastica, fil di ferro, etc.) che devono essere separate dalla fibra. L'impasto contenuto in ogni tina di stoccaggio, previa eventuale diluizione per mantenere la concentrazione vicina al 4,5-5% (la concentrazione è regolata automaticamente tramite una misura in continuo per mezzo di opportuni rilevatori), viene inviato ad una macchina chiamata "epuratore a pasta densa" che elimina tutte quelle impurità che hanno un peso specifico molto diverso da quello della cellulosa: l'impasto è immesso tangenzialmente alla macchina in modo che le parti pesanti siano proiettate sulle pareti del cono e perdendo velocità per effetto dell'attrito di strisciamento precipitano raccogliendosi nel fondo dell'epuratore, mentre le parti più leggere, cioè le fibre, tendono a risalire verso l'alto nella parte centrale dell'epuratore dove la pressione è inferiore rispetto alle pareti. L'epuratore automaticamente e a tempi prestabiliti apre la valvola di fondo spurgando le impurità. Un successivo passaggio che subisce l'impasto è quello attraverso la macchina denominata "depastigliatore": la cellulosa spappolata non è un fluido omogeneo, nel senso che non tutte le fibre sono separate tra loro e possono essere presenti in questo stato della preparazione dei grumi di fibre non idonei ad essere trasformati in carta. Lo scopo del depastigliatore è quello di frantumare, se necessario, questi grumi in modo tale che tutte le fibre siano separate tra loro: per ottenere questo risultato si costringe l'impasto a fluire tra un rotore ed uno statore posti a distanza regolabile.

5.1.5 Miscelazione (tine di miscela e tine di macchina).

L'impasto, dopo aver subito i trattamenti di epurazione viene trasferito nelle tre tine di miscela denominate rispettivamente Y, M e H. Le tine di miscela Y e H possono essere alimentate solo dalle tine di stoccaggio della fibra lunga e/o della fibra corta, ma non è possibile alimentarle con gli sfridi di lavorazione o con cellulose meno pregiate. Nella tina di miscela M possono essere inviate tutte le cellulose spappolate, compresi gli sfridi di lavorazione e le fibre recuperate nel trattamento delle acque di processo. Da questo punto in poi tutto l'impianto è diviso in tre linee

separate tra loro: linea Y, linea H, linea M. La separazione delle tre linee consente di alimentare separatamente i tre settori della cassa di afflusso in modo da ottimizzare le caratteristiche delle cellulose ed avere sul tissue finale in particolare nello strato esterno Y a contatto della pelle la fibra corta morbida, nell'altro strato esterno H la fibra lunga che dà resistenza meccanica e nello strato centrale M il mix di fibre a riempimento. Dalle tine di miscela l'impasto viene inviato nelle 3 tine di macchina Y, H e M subendo (in particolare nelle linee Y e H) una ulteriore diluizione fino alla concentrazione del 4-4,5%.

5.1.6 Raffinazione.

Dalle due linee Y e H l'impasto può essere inviato nelle due macchine chiamate "raffinatori" che consentono di lavorare la fibra e dare al foglio di carta la necessaria resistenza. In particolare nel tissue per carta igienica viene raffinata solo la fibra lunga, cioè la linea H: questa separazione delle fibre e delle linee dell'impasto consente di ottimizzare i risultati e i consumi energetici della raffinazione. La raffinazione della cellulosa rappresenta il processo fondamentale nella fabbricazione della carta consentendo al foglio di carta prodotto di acquisire proprietà meccaniche indispensabili al suo impiego: in particolare la resistenza meccanica di un foglio di carta è un requisito fondamentale soprattutto in carte a bassa grammatura come il tissue. La raffinazione è un trattamento meccanico della cellulosa in presenza di acqua, trattamento che con una serie di sollecitazioni meccaniche di flessione e schiacciamento modifica la struttura morfologica della cellulosa: in maniera intuitiva possiamo dire che la raffinazione "apre" la fibra cellulosica rendendo possibile una maggiore quantità di legami tra fibra e fibra (chimicamente sono legami "ponte a idrogeno" tra i gruppi ossidrilici OH presenti nella cellulosa), con conseguente aumento della resistenza meccanica del foglio di carta prodotto. La presenza dell'acqua nel processo di raffinazione della cellulosa è fondamentale: una raffinazione "a secco" porterebbe solo ad uno spezzettamento delle fibre di cellulosa, mentre la raffinazione condotta sull'impasto acqua-cellulosa permette di lavorare la fibra cellulosica formando legami ad idrogeno con l'acqua, legami che dopo l'essiccamento del foglio si riformano tra fibra e fibra.

5.1.7 Seconda e terza fase di epurazione dell'impasto.

L'impasto viene inviato dai raffinatori ai tre cassettei a livello costante e successivamente subisce, previa ulteriore diluizione, una nuova epurazione attraverso gli epuratori a bassa densità o cleaners. I cleaners funzionano con lo stesso principio degli epuratori a pasta densa, ma sono dedicati ad eliminare (se necessario) dall'impasto tutti gli inquinanti di piccole dimensioni. Dovendo trattare l'impasto con concentrazioni basse, intorno a 1-1,5%, si utilizzano "batterie di epuratori": generalmente gli stadi sono 3. L'impasto diluito viene inviato alla prima batteria, il cui accettato va in macchina mentre il rifiuto va all'alimentazione del 2° stadio; l'accettato del 2° stadio va sull'alimentazione del 1° stadio mentre il rifiuto va all'alimentazione del 3° stadio; l'accettato del 3° va all'alimentazione del 2° mentre il rifiuto è lo scarto che genera tutto il trattamento di epurazione a bassa densità. Lo scarto generato dai cleaners delle tre linee Y, H e M viene convogliato nel vascone di raccolta delle acque reflue (acque inviate poi al trattamento

prima dello scarico) e il contenuto solido di questo scarto è quello che principalmente contribuisce alla produzione dei fanghi che costituiscono il “rifiuto solido” del ciclo produttivo: l’ottimizzazione di questi impianti di epurazione è quindi significativa per la riduzione dei fanghi di cartiera. L’impasto ulteriormente diluito (concentrazione 0,2%) prima di alimentare la cassa di afflusso viene inviato tramite tre pompe (fan pump Y – fun pump H – fun pump M) all’ultimo trattamento di epurazione tramite i tre epuratori centrifughi. L’epuratore centrifugo o selettore di macchina ha due funzioni, la prima è quella di eliminare tutte le impurezze che hanno un peso specifico prossimo a quello della cellulosa, la seconda è di omogeneizzare l’impasto prima del suo ingresso in cassa di afflusso. L’impasto è introdotto tangenzialmente all’interno della macchina dove sono alloggiati una girante a pale ed un cestello forato o a fessure che è l’elemento filtrante. Il moto tangenziale fa sì che eventuali impurezze pesanti vengano eliminate senza l’ausilio del cestello che invece è dedicato alle impurità leggere. Queste ultime vengono continuamente rimosse dall’azione delle pale della girante: il profilo delle pale genera una depressione durante la rotazione che espelle le impurità bloccate dal cestello che si presenta sempre pulito alla pasta in arrivo. L’impasto dall’interno del cestello raggiunge l’uscita dell’epuratore e senza subire ulteriori lavorazioni giunge in cassa di afflusso.

5.1.8 Formazione del foglio.

La fase successiva alla preparazione dell’impasto è la formazione del foglio che, insieme alla fase di essiccamento, avviene nell’impianto denominato “macchina continua”, il cuore della produzione del tissue. Il processo di formazione del foglio è sostanzialmente di tipo idrodinamico e coinvolge tutte le componenti dell’impasto siano esse fibre, fini o cariche. I processi base che contribuiscono alla formazione della carta sono:

- drenaggio, cioè l’eliminazione di acqua dalla sospensione fibrosa;
- forze di orientamento, cioè forze che inducono una direzionalità alle fibre;
- turbolenza, ovvero rottura del reticolo fibroso e aumento del drenaggio;
- ritenzione, cioè il trattenimento della fibra.

Questi processi sono influenzati dalla qualità delle fibre, dai trattamenti effettuati in preparazione impasto, dagli additivi chimici, dalle tele, dalla cassa di afflusso.

5.1.9 Cassa di afflusso.

L’impasto estremamente diluito (si parte da una concentrazione pari al 12% nel pulper per arrivare al momento della formazione ad una concentrazione in fibra pari a 0,2%) dopo l’ulteriore epurazione avvenuta nei selettori, raggiunge la cassa di afflusso. La cassa di afflusso ha il compito di distribuire in maniera uniforme le fibre dell’impasto in modo che il foglio sia quanto più possibile omogeneo e tale da presentare in ogni punto le stesse caratteristiche.

5.1.10 Formazione “crescent former” – tela e feltro.

La tecnologia di formazione del foglio-tissue utilizzata nell'impianto di Castenuovo è una tecnologia sviluppatasi in particolare nell'ultimo decennio e denominata “Crescent Former”. In pratica il principio è quello di alimentare l'impasto uscente dalla cassa di afflusso tra una tela ed un feltro che, immediatamente a valle del punto di ricezione del getto, si congiungono in modo molto stretto, favorendo la separazione dell'acqua dalla fibra. L'area di drenaggio è a ridosso del rullo formatore e lo interessa per circa 90-100°. L'acqua che attraversa la tela viene raccolta e convogliata tramite un canale in un grande serbatoio (silo) dove viene prelevata dalle fan-pump per la diluizione della pasta proveniente dalla preparazione impasto. Rispetto alle altre tecnologie di formazione (tavola piana e doppia tela) il Crescent Former, oltre a produrre un tissue ad alto livello qualitativo in particolare per la morbidezza, presenta altri vantaggi fra cui, ad esempio, la possibilità di concreti risparmi in termini di materiali e di energia. La tela e il feltro sono componenti fondamentali per una macchina continua e dalle loro caratteristiche dipendono il consumo energetico, la formazione del foglio e l'efficienza dell'impianto. Sia la tela che il feltro sono costruiti con materiali sintetici, ma con caratteristiche e modalità di fabbricazione completamente diverse in modo da realizzare questi due componenti con proprietà molto differenti tra loro in particolare per quanto riguarda la permeabilità. Il feltro ha la funzione di trasportare il foglio di carta al monolucido per la fase di asciugamento del foglio stesso.

5.1.11 Asciugamento del foglio.

Come emerso dalla descrizione delle fasi precedenti la quantità di acqua in gioco nella formazione del foglio tissue è elevata, fino ad arrivare alla cassa di afflusso dove la sospensione fibrosa è costituita per il 99,8% di acqua: la quantità di acqua drenata attraverso la tela di formazione è un significativo contributo all'asciugamento del foglio, ma è necessario eliminare l'eccesso di acqua attraverso un “intervento meccanico” e un “intervento termico”.

5.1.12 Presse aspirante e fori ciechi.

Prima di essere trasferito al monolucido, al foglio di carta trasportato dal feltro viene sottratta acqua per via meccanica e tramite aspirazione per mezzo di due presse denominate rispettivamente Pressa Aspirante e Pressa a fori ciechi (il nome di quest'ultima deriva dal fatto che, contrariamente a quella aspirante, i fori presenti sul rivestimento non sono passanti, ma ciechi). Lo scopo delle presse, rivestite superficialmente con uno strato di gomma, è quello di premere il foglio di carta e il feltro che lo supporta a contrasto con un elemento rigido in modo da indurre l'acqua contenuta nel foglio a migrare verso il feltro: nel caso degli impianti tissue, l'elemento rigido è costituito dal monolucido. L'azione delle presse ha due effetti:

- trasferire il foglio sul monolucido (Pressa Aspirante);
- aspirare e centrifugare l'acqua in eccesso dal foglio di carta.

5.1.13 Monolucido e cappe ad alta efficienza.

Il foglio di carta uscito dalla zona presse ha in genere un secco di circa 48 % e deve essere portato al valore finale di 94-97%. Questo essiccamento del foglio avveniva a mezzo di un cilindro monolucido riscaldato con vapore e con l'ausilio di cappe a riscaldamento diretto. Dal settembre 2014 si ha invece l'utilizzo i fumi dell'impianto di cogenerazione in sostituzione delle cappe tradizionali a bruciatori. Solo in emergenza, in caso di non funzionamento della cogenerazione entrano in funzione due bruciatori dedicati alle cappe. Senza entrare nel dettaglio delle complesse caratteristiche in particolare del monolucido, possiamo sintetizzare questa fase finale di essiccamento ricordando che il foglio di carta ormai aderente al monolucido viene così essiccato: il cilindro monolucido trasmette al foglio il calore fornito dal vapore contenuto al suo interno, a sua volta prodotto nell'impianto di cogenerazione, ma per completare l'asciugamento del monolucido è necessario garantire una elevata ventilazione del foglio di carta e a questo scopo venivano utilizzate due cappe ad alta efficienza che riscaldavano direttamente il foglio per convezione, sfruttando i fumi di combustione di bruciatori a metano. Ora invece si utilizzano i fumi di scarico dell'impianto di cogenerazione che ad elevata velocità e temperatura vengono a contatto con il foglio, per essere poi convogliati all'esterno. Le cappe sono posizionate nella parte superiore del cilindro monolucido e avvolgono quest'ultimo per circa 180°. Il foglio essiccato viene staccato dal monolucido con una lama crespatrice, che conferisce alla carta l'aspetto caratteristico dei prodotti tissue, ed avvolto su mandrini formando i rotoli a piè di macchina continua: la fase di stacco del foglio di tissue dal monolucido è una fase estremamente delicata e per regolare l'aderenza della carta, sono nebulizzate sul cilindro piccole quantità di additivi la cui composizione è costituita da acqua, e mix di prodotti chimici che hanno il duplice scopo di far aderire e/o distaccare il foglio alla superficie del monolucido ed allo stesso tempo proteggere la stessa dall'azione meccanica data dalla lama crespatrice. Il controllo della grammatura e dell'umidità del foglio di tissue viene effettuato in automatico tramite una apparecchiatura dotata di sorgente radioattiva.

5.1.14 Allestimento bobine tissue.

Il foglio di carta staccato dal monolucido viene avvolto dal così detto "pope" in bobine ad 1 velo che, a seconda della trasformazione a cui sono destinate, sono inviate direttamente al Converting per la produzione dei rotoli oppure alla ribobinatrice per la preparazione di bobine più piccole atte alla lavorazione al converting sulle linee dei tovaglioli o fazzoletti.

5.1.15 Produzione prodotto finito – Converting.

Le bobine prodotte dalla macchina continua vengono inviate alle linee di trasformazione del converting che prevedono il taglio a misura della carta ed il confezionamento e l'imballaggio. In particolare nella produzione dei rotoli durante la fase di trasformazione delle bobine di tissue i due veli vengono incollati tra loro e possono essere decorati con disegni come nel caso dei rotoli cucina.

5.1.16 Stoccaggio e spedizione bobine tissue e prodotto finito.

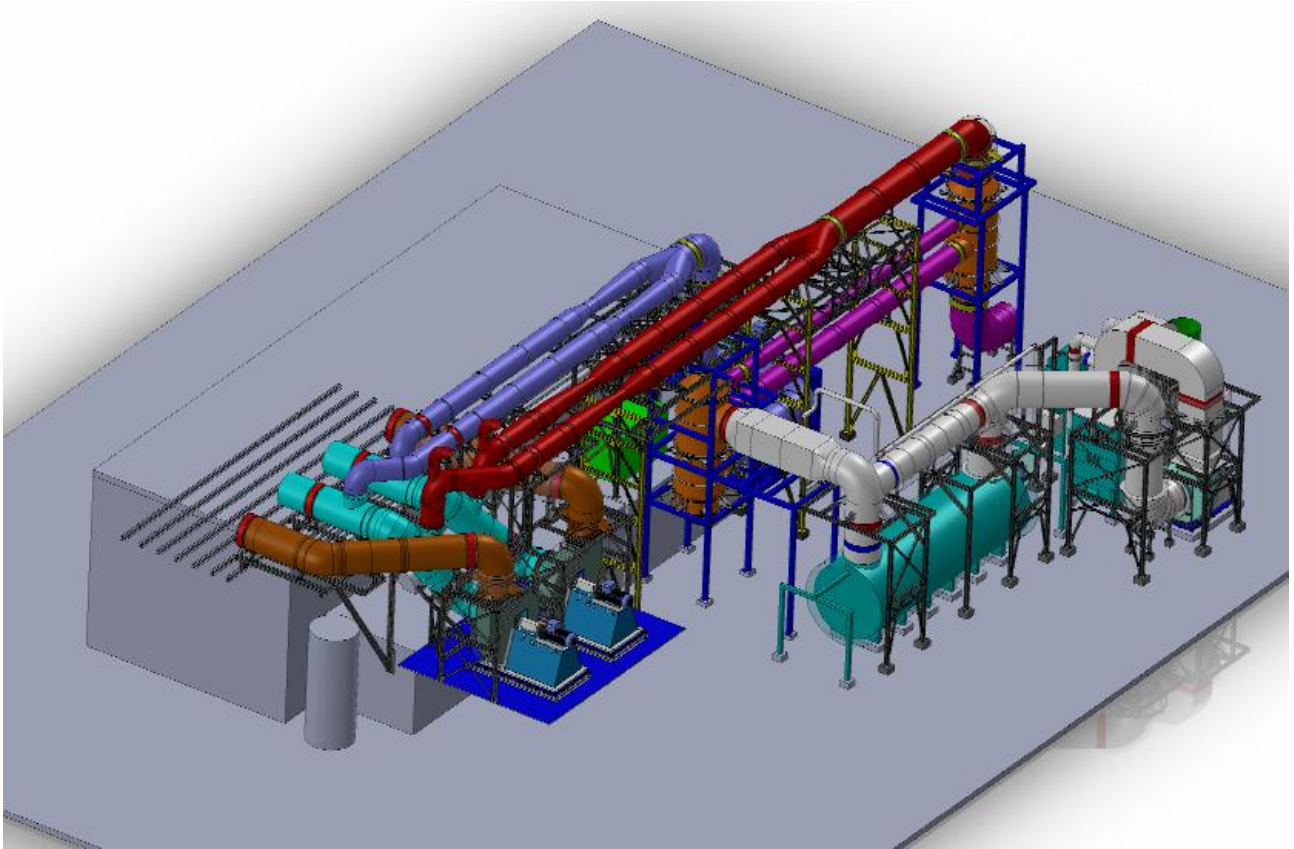
Le bobine tissue e i prodotti finiti sono infine stoccati in magazzini afferenti al tipo di prodotto intermedio o finito. Il prodotto finito viene caricato sugli autotreni attraverso l'utilizzo di muletti e spedito ai clienti/utilizzatori, mentre le bobine di tissue prodotte sono in parte utilizzate all'interno dello stabilimento nel reparto Converting ed in parte inviate a clienti.

5.1.17 Stoccaggio prodotto finito non conforme.

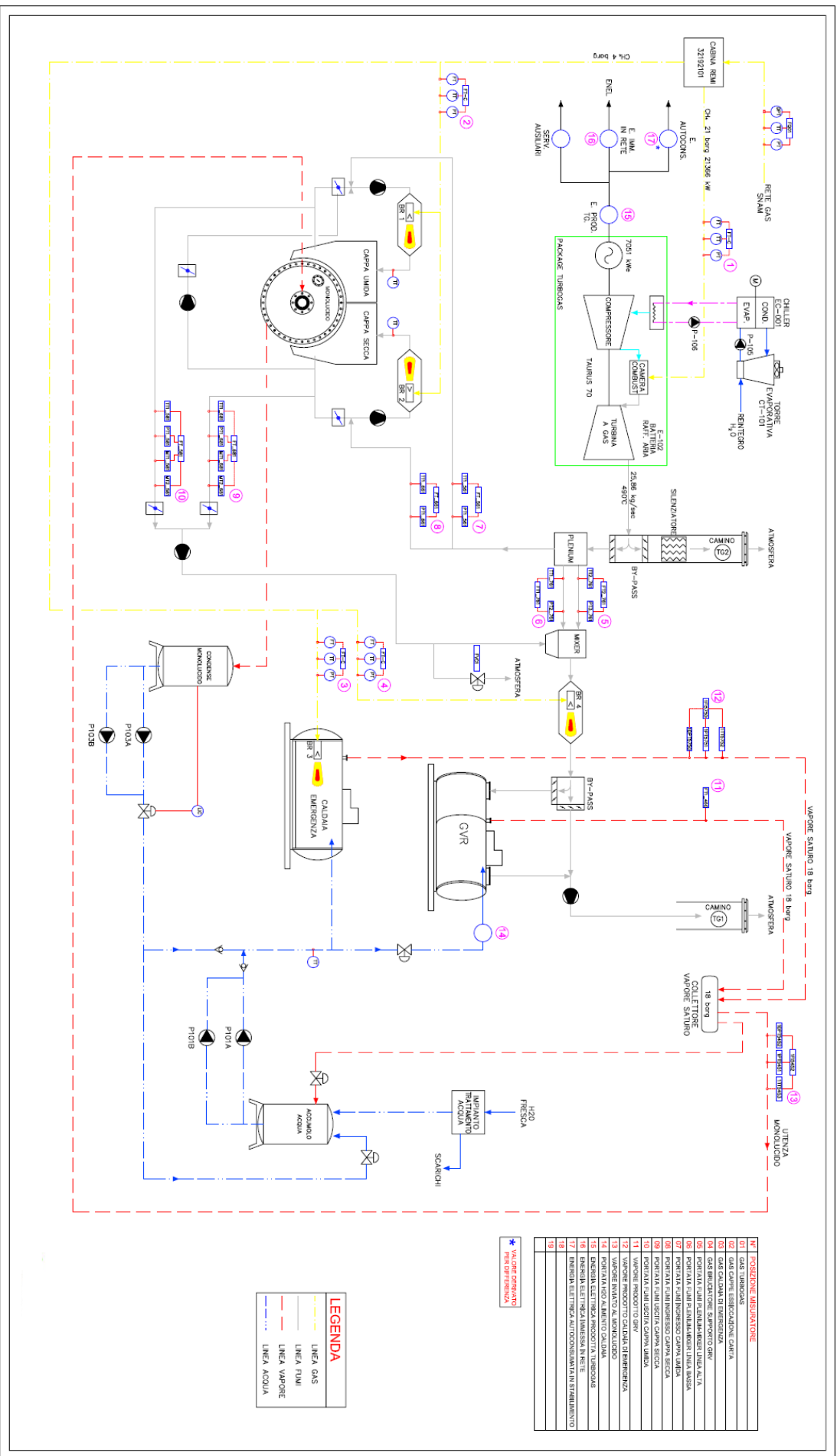
Il prodotto finito che risulta non conforme alle caratteristiche previste, viene stoccato temporaneamente in un piazzale (*Area di Taglio*) dove viene successivamente tagliato e conferito nel ciclo produttivo per la produzione di un nuovo impasto.

5.2 Sistemi di generazione e servizi ausiliari.

L'impianto è dotato anche di un impianto di cogenerazione costituito da turbina a gas, alimentata a gas naturale, e generatore di vapore a recupero. In caso di esigenza di maggiore produzione di vapore, è presente un post-combustore subito a monte del GVR. L'impianto è anche munito di caldaia di emergenza che può provvedere alla generazione di tutto il vapore per la macchina continua, in caso di fermo o disservizio della turbina a gas. Tutto il vapore prodotto viene inviato al monolucido della macchina continua. L'impianto ha subito nel corso del 2014 una revisione sostanziale del ciclo cogenerativo, in particolare è stata eliminata la turbina a vapore, che in precedenza utilizzava il vapore surriscaldato prodotto dal ciclo combinato, ed i fumi prodotti dalla combustione in turbina, vengono adesso utilizzati sia per le cappe della macchina continua, sia per la generazione del vapore saturo per il monolucido, attraverso il GVR. Tutto questo è una testimonianza concreta per la grande attenzione rivolta al settore, caratterizzato da cambiamenti impiantistici anche importanti nel tempo per motivi di competitività. Di seguito una vista in tre dimensioni dell'impianto, successivamente è riportato il vecchio schema impiantistico e poi quello nuovo.

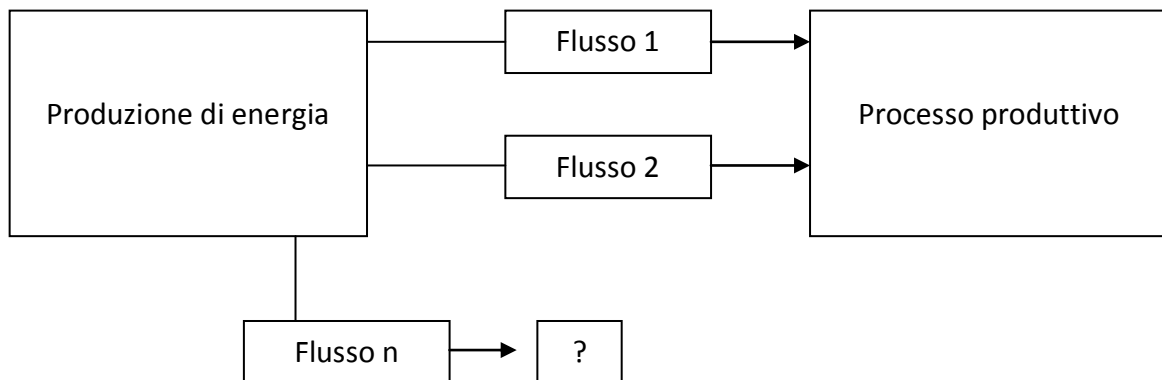




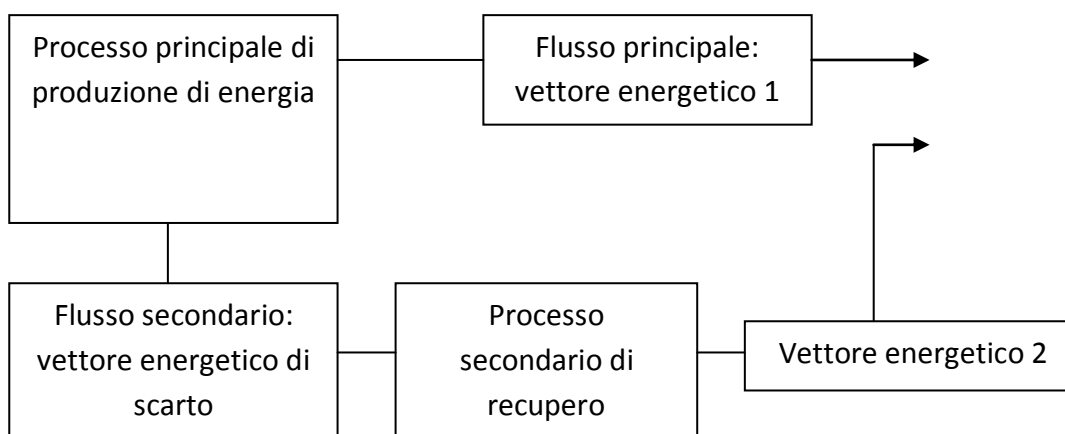


6. Integrazioni e ottimizzazioni di processo.

Dopo aver valutato le varie possibili alternative tecnologiche per la produzione di energia termica ed elettrica, con lo scopo di incrementare le BAT (best available technologies), l'obiettivo da porsi è la ricerca e l'individuazione delle modalità di sfruttamento di tutti quei flussi energetici secondari, che sono intrinsecamente legati al processo di produzione principale.

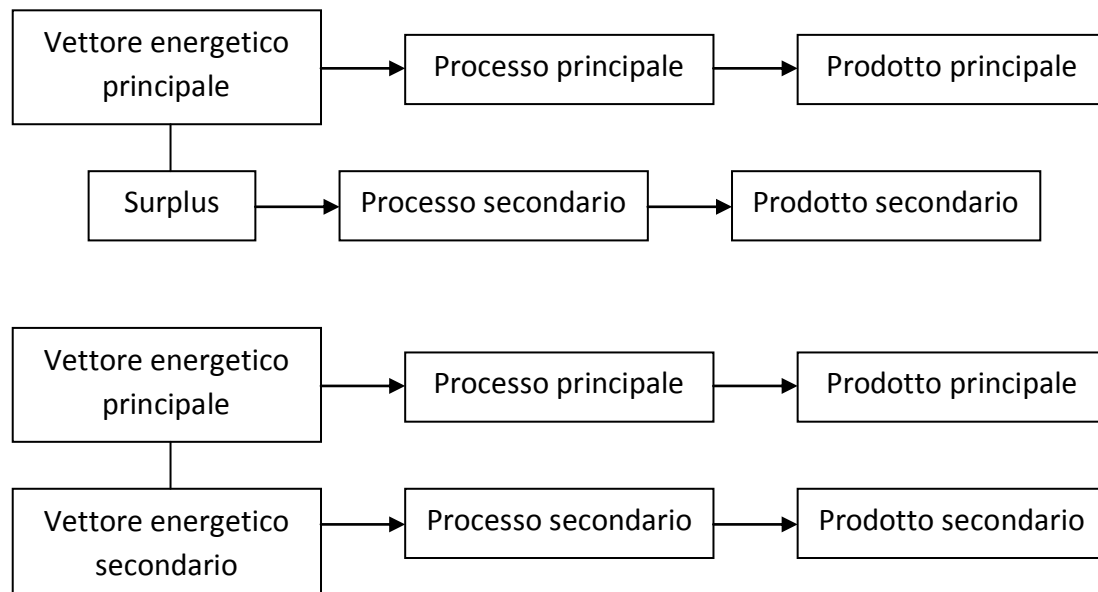


La cogenerazione rappresenta già di per sé una risposta a questo tipo di problema, tuttavia come abbiamo visto nel capitolo 4, il dimensionamento di un sistema che alimenti utenze di due tipologie diverse implica spesso l'eccedenza di uno dei due vettori energetici rispetto a quanto richiesto, oppure, come nel caso dei motori a combustione interna, la presenza di un terza tipologia di flusso. Va inoltre osservato che la cogenerazione affronta il problema nella parte sinistra del grafico riportato sopra, ossia sfrutta uno scarto per produrre un nuovo vettore utile:

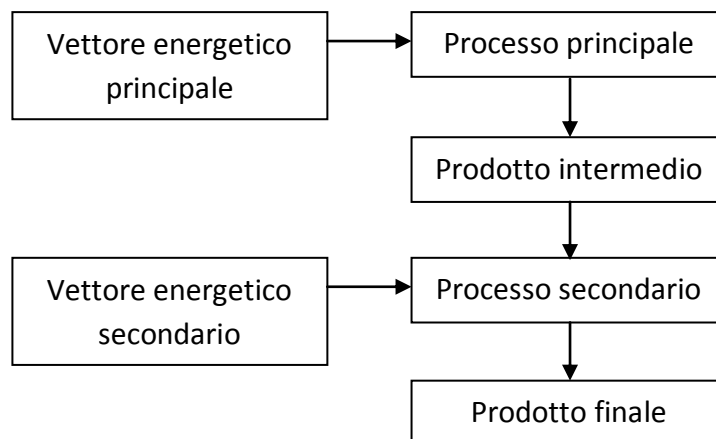


In presenza di scenari in cui tutte le utenze energetiche sono soddisfatte, il problema si sposta nella parte destra del grafico n., ossia, come nel caso affrontato, vanno valorizzate le eccedenze onde evitare la dispersione di correnti e per migliorare l'efficienza complessiva di un sito. L'utilizzo di strategie di questo genere su vasta scala, oltre ad apportare benefici a singole realtà può

migliorare i trend globali di un intero settore. L'idea di base, in analogia alla cogenerazione, è quella di affiancare una lavorazione secondaria a quella primaria:



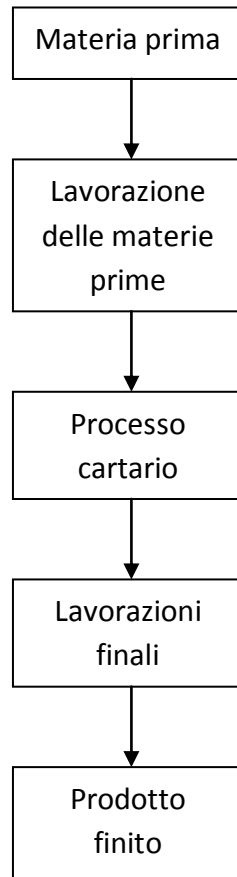
Un ulteriore passo verso l'ottimizzazione consiste poi nell'inserimento di un processo bottom che agisce sul prodotto del processo top, tale da attribuire un valore aggiunto che giustifichi il maggior impiego di energia.



Nel panorama cartario abbiamo visto come i passaggi dalla materia prima al prodotto finito utilizzabile siano molteplici, riassumibili in:

- lavorazione delle materie prime, ossia estrazione della cellulosa, raccolta della carta da riciclare, produzione delle paste legno, etc;
- processo cartario, rappresentato dalle lavorazioni che avvengono nello stabilimento di cartiera;

- lavorazioni finali, da non confondere con le lavorazioni finali che avvengono entro lo stabilimento (allestimento, ribobinatura), comprendenti il converting, la patinatura, il packaging e tutti quei passaggi atti a fornire materiali cartacei pronti per l'utilizzo.



L'attenzione si concentra dunque intorno alle lavorazioni finali, visto che la lavorazione delle materie prime a livello nazionale non viene generalmente attuata (ad eccezione del riciclo e della raccolta della carta già utilizzata) ma si ha l'acquisto dall'estero del materiale da destinare all'ingresso dello stabilimento. Oltre ai già citati e ovvi vantaggi di riutilizzo dei flussi energetici in eccesso, se ne aggiungono altri di carattere logistico: l'accoppiamento in un unico sito di due filiere complementari comporta la riduzione dei costi legati al trasporto, la riduzione dei problemi di logorio dei materiali dovuti a successivi stoccaggi in magazzino, etc.

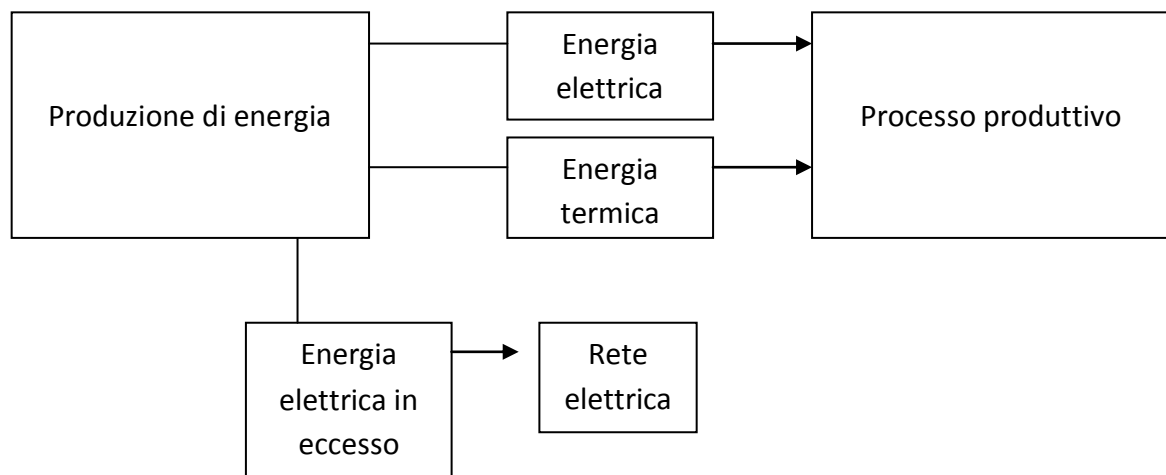
Tornando ai flussi energetici in surplus soluzione per soluzione ricavati nel capitolo precedente, si riporta nuovamente il riepilogo delle varie situazioni:

- per la soluzione che prevede l'installazione di un turbogas e un generatore di vapore funzionanti separatamente (soluzione 1), l'ottimizzazione è consistita nel passaggio ad una configurazione unitaria con l'unione dei due elementi, per cui non viene qui approfondita;
- per il diretto sviluppo della soluzione 1, ossia cogenerazione tramite turbogas, postcombustore e generatore di vapore a recupero (soluzione 4.1) si ha un eccesso di

energia elettrica, sia per il caso 1 (produzione di cartone da RCF) che per il caso 2 (produzione di carta tissue da fibra vergine), dovuto alla taglia dei gruppi turbogas che eccedono la domanda di energia.

Soluzione 4.1		
	Caso 1	Caso 2
Energia elettrica in eccesso [kWh/y]	12760000	360000

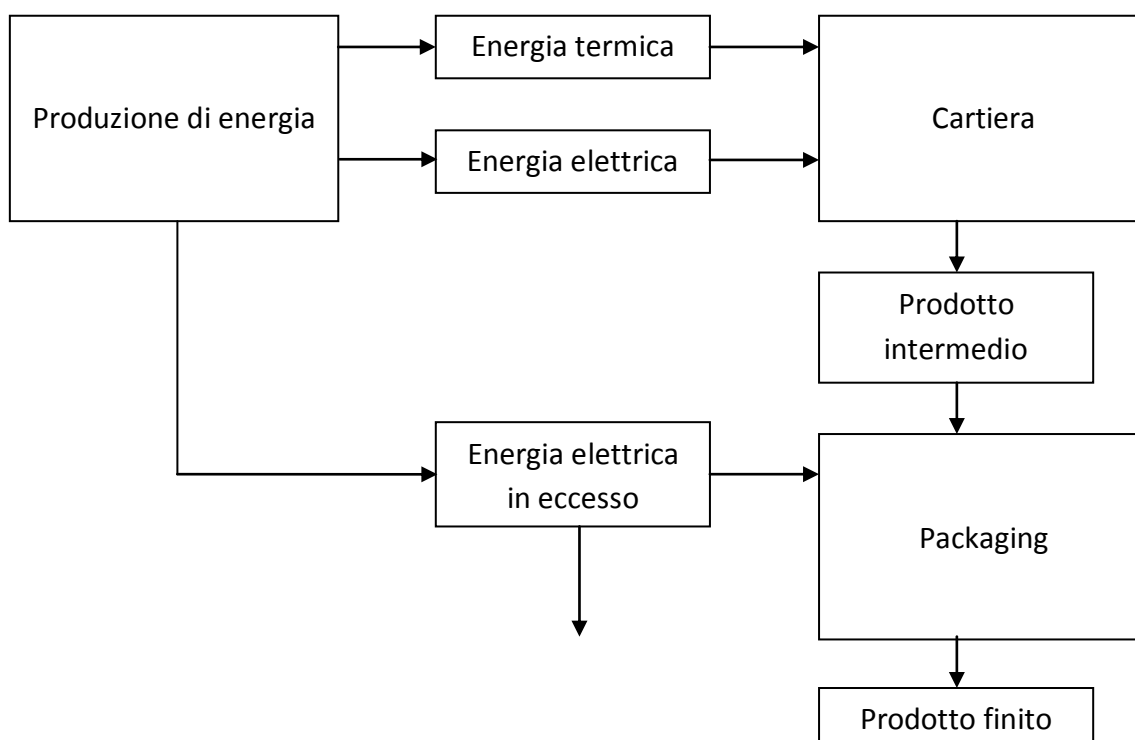
Il vettore elettrico può innanzitutto essere immesso in rete: previo passaggio attraverso un trasformatore che elevi il valore della tensione a quello della rete di distribuzione, è frequente la vendita da parte di uno stabilimento dell'energia elettrica non utilizzata. La connessione con le linee di un ente distributore è importante anche qualora si verifichi la necessità di un prelievo di energia (picco di consumo, guasto) per non fermare la produzione.



In alternativa, i processi di lavorazione finale che possono essere affiancati al principale sono il packaging (realizzazione di imballaggi di cartone) per il prodotto del caso 1, il converting per il caso 2.

La realizzazione di imballaggi di cartone avviene grazie ad una catena di macchinari che con azioni meccaniche e, in piccolissima parte, termiche vanno ad agire sul prodotto della cartiera. Un In un impianto tipo innanzitutto si ha una fase di svolgimento delle bobine di cartone, quindi la realizzazione di un'anima ondulata con particolari caratteristiche di resistenza meccanica, atte a rendere idoneo il prodotto finale al trasporto ed al contenimento. L'anima viene quindi protetta dall'applicazione di un foglio liscio su entrambi i lati. Una volta fatto si hanno le macchine che piegano il pannello formatosi e lo conformano nella forma desiderata. Le giunture possono venir saldate tramite una colla termo fusibile e alcuni elettrodi e infine si ha l'immagazzinamento e la spedizione.

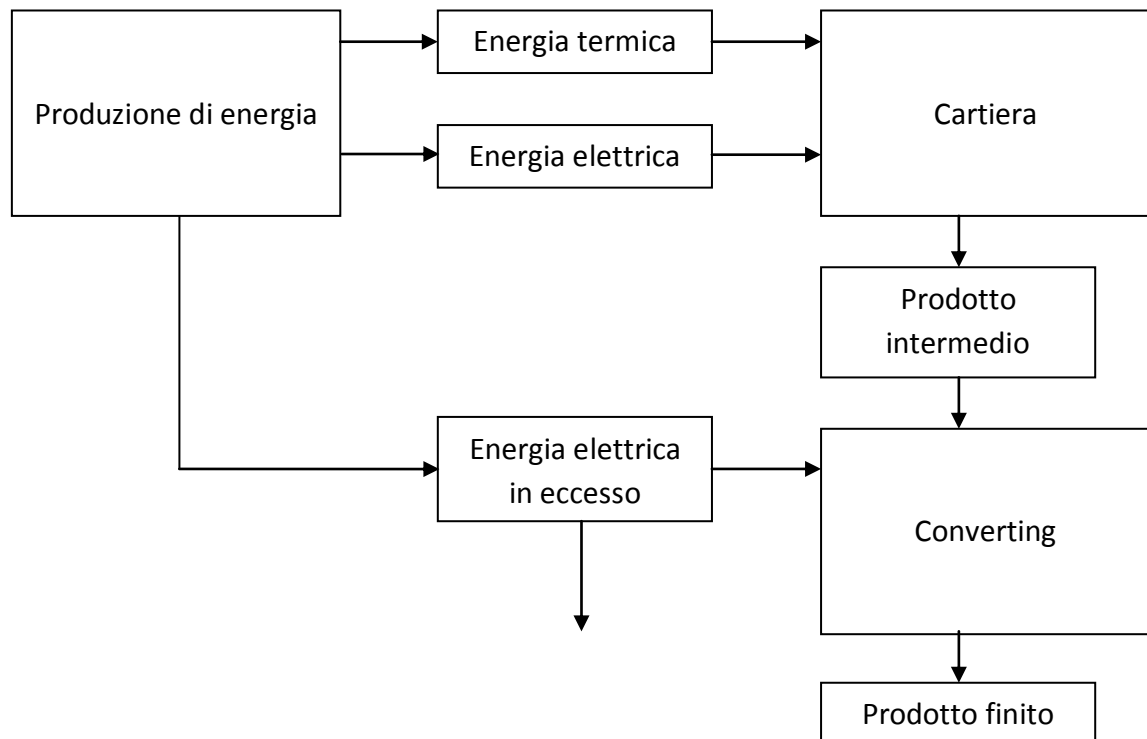
L'introduzione di una sezione del genere assunta come modello comporta l'installazione di utenze energetiche con un consumo annuale pari a 84000 kWh, valore che riduce la quantità di energia prodotta in più e che contribuisce a valorizzare il materiale in uscita.



Soluzione 4.1	
Grandezza	Caso 1: cartone da RCF
Energia elettrica in eccesso prodotta [kWh/y]	12760000
Energia elettrica utilizzata dal packaging [kWh/y]	84000
Energia elettrica in eccesso residua [kWh/y]	12676000

Il converting rappresenta l'intervento integrativo sul prodotto uscente dalla cartiera equivalente al packaging, viene però applicato alle bobine di carta tissue, permettendo l'ottenimento di rotoli asciuga tutto, carta per usi sanitari, etc. Le lavorazioni sono di tipo meccanico e consistono nello svolgimento delle bobine di cartiera e nella sovrapposizione ed unione di più fogli; poi a seconda della merce desiderata in uscita si può avere: riarrotolamento attorno ad un'anima di cartone sottoforma di bobine più piccole (minor numero di avvolgimenti), taglio trasversale per la formazione dei rotoli con l'altezza desiderata nel caso di articoli arrotolati; taglio lungo due dimensioni e piegatura nel caso di articoli tipo fazzoletti, tovaglioli, etc. Infine per tutte le tipologie si ha il confezionamento, lo stoccaggio e la spedizione.

Nel caso 2, si suppone di avere un'area converting con un consumo elettrico annuale di 350000 kWh, che analogamente a quanto visto prima riduce l'entità del surplus.



Soluzione 4.1	
Grandezza	Caso 2: Tissue da fibra vergine
Energia elettrica in eccesso prodotta [kWh/y]	360000
Energia elettrica utilizzata dal converting [kWh/y]	350000
Energia elettrica in eccesso residua [kWh/y]	10000

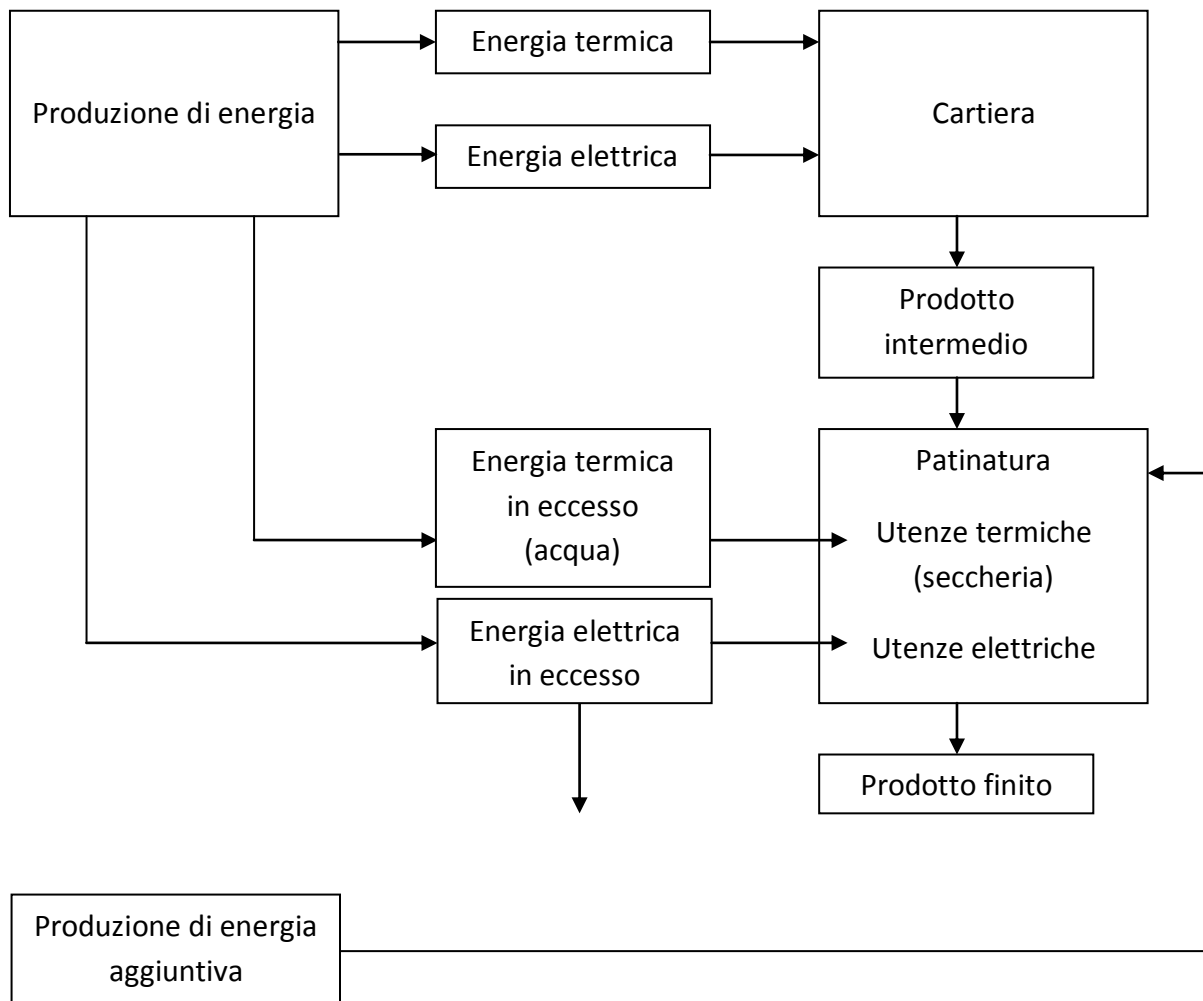
- Per la soluzione 4.2 (turbogas e generatore di vapore a recupero senza postcombustore, dimensionati a partire dal vapore necessario, quindi con taglia del gruppo turbogas sovrastimata), si ha una situazione analoga alla precedente con il vettore energetico in eccesso, ma in maniera molto più marcata. Anche l'approccio al problema di conseguenza è lo stesso.
- Per le soluzioni 3 e 5, ovvero rispettivamente utilizzo di un generatore di vapore accoppiato ad una turbina con spillamento e turbogas con postcombustore, generatore di vapore a recupero e turbina a vapore non si hanno flussi in eccesso, per cui non si pone il problema di integrare il processo principale con uno secondario.
- Le soluzioni 6.1 e 6.2, che prevedono l'impiego di motori a combustione interna, rispettivamente con e senza postcombustore (nel primo caso il dimensionamento è realizzato a partire dal fabbisogno elettrico, nel secondo a partire da quello termico), forniscono interessanti spunti di riflessione. I flussi in eccesso sono costituiti dal vettore elettrico (dovuto anche qui alla presenza di macchine con una taglia che eccede la richiesta) e dal vettore termico associato all'acqua di raffreddamento del/dei motore/i.

Soluzione 6.1	
Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Energia elettrica in eccesso [kWh/y]	360000
Energia termica in eccesso in forma di acqua calda ad 85°C [kWh/y]	5107200

L'allacciamento alla rete garantisce la collocazione del vettore elettrico eccedente, per quanto riguarda il vettore termico invece una soluzione di questo tipo non è possibile. Si può optare quindi per la lavorazione finale rappresentata dalla patinatura.

La patinatura o coating, come suggerisce il nome stesso, consiste nella stesura sopra il foglio di uno o più strati di una patina che migliori la superficie, ed in particolare la renda adatta alla stampa. La patina utilizzata è costituita da un insieme di pigmenti uniti tra loro da sostanze leganti. La stesura della patina avviene grazie alla combinazione di elementi rotanti in più varianti simili agli elementi della sezione presse, ad un certo numero di barre in acciaio che raschiano la patina in eccesso effettuando un'azione di finitura ed infine da un fase di asciugamento. In primo luogo l'essiccamento della patina necessita di elementi riscaldanti ad infrarosso per questioni di omogeneità della patina, sia in superficie che nello spessore (l'aria in movimento potrebbe creare disomogeneità), successivamente si utilizza aria calda ad oltre 200°C, talvolta associata a cilindri essiccatori. Il grado di secco dipende dal tipo di patina che si vuole realizzare. Infine si hanno le solite procedure di allestimento, stoccaggio, trasporto. Questa fase può essere seguita da una fase di packaging, da una fase di stampa od altro.

Per le configurazioni in questione, supposto che esse siano applicate solo alla prima casistica (cartone da rcf), la patinatura si presta particolarmente, in quanto il vettore elettrico è utile a muovere in vari macchinari di questa filiera aggiuntiva, mentre l'energia termica dell'acqua calda può essere utilizzata per preriscaldare l'aria essiccatrice. Ovviamente è necessario un ulteriore input energetico per soddisfare interamente la domanda.



Soluzione 6.1	
Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Energia elettrica in eccesso prodotta [kWh/y]	80000
Energia elettrica utilizzata dal processo di patinatura [kWh/y]	375000
Energia elettrica mancante [kWh/y]	295000

L'energia termica associata all'acqua di raffreddamento motori può in modesta parte contribuire al pre-riscaldamento dell'aria utilizzata o dell'acqua per l'essiccamento, tuttavia la qualità stessa dell'energia (appunto acqua a 85°C di temperatura), non consente l'indipendenza da un apporto energetico ulteriore. Una valutazione quantitativa esatta è complesso effettuarla vista la scarsità di fonti, si suppone cautelativamente che essa avvenga tramite soffiaggio di gas caldi con cappe. Il consumo di questo sistema si stima uguale a quello presente nella seccheria della cartiera per l'asciugatura del foglio.

Soluzione 6.1	
Grandezza	Caso 3: cartone da RCF
Energia termica in eccesso prodotta (acqua ad 85°C) [t/h]	36
Energia utilizzabile nel processo di patinatura [kWh]	5107200
Energia termica utilizzata dal processo di patinatura [kWh/y]	9000000
Energia termica mancante [kWh/y]	3892800

L'acqua andrà a preriscaldare fino a circa 75°C l'aria andando a limitare il consumo di gas ed impedendo il completo inutilizzo della corrente.

Per la soluzione 6.2 possono essere effettuate considerazioni analoghe, qui si hanno molti più kWh elettrici, che risultano in eccesso anche oltre la copertura del fabbisogno aggiuntivo della patinatura. In campo termico si ha anche qui molto più calore, però esistono le stesse limitazioni legate alla temperatura: un processo di essiccamento, che richiede aria molto calda per un essiccamento rapido, necessita di una fonte tipo i bruciatori a gas, e un flusso di acqua calda può servire solo per ridurre il computo totale del gas utilizzato negli stessi, in quanto in base al secondo principio della termodinamica non è possibile riscaldare un mezzo ad una certa temperatura mediante un altro mezzo a temperatura più bassa della stessa. Quindi oltre agli svantaggi già citati dell'utilizzo di un gruppo multiplo di motori a combustione interna, si hanno limitazioni anche con un processo integrativo del genere.

- La soluzione 2, che prevede l'installazione di un generatore di vapore con una turbina a contropressione in cascata, abbiamo visto come fornisca vapore saturo a 2 bar e 120°C in surplus, con portate differenti a seconda che si analizzi il caso 1 o il caso 2.

Soluzione 2		
	Caso 1: cartone da RCF	Caso 2: Tissue da fibra vergine
Energia termica in eccesso (portata di vapore a 2 bar, 120°C) [t/h]	2,36	17,84

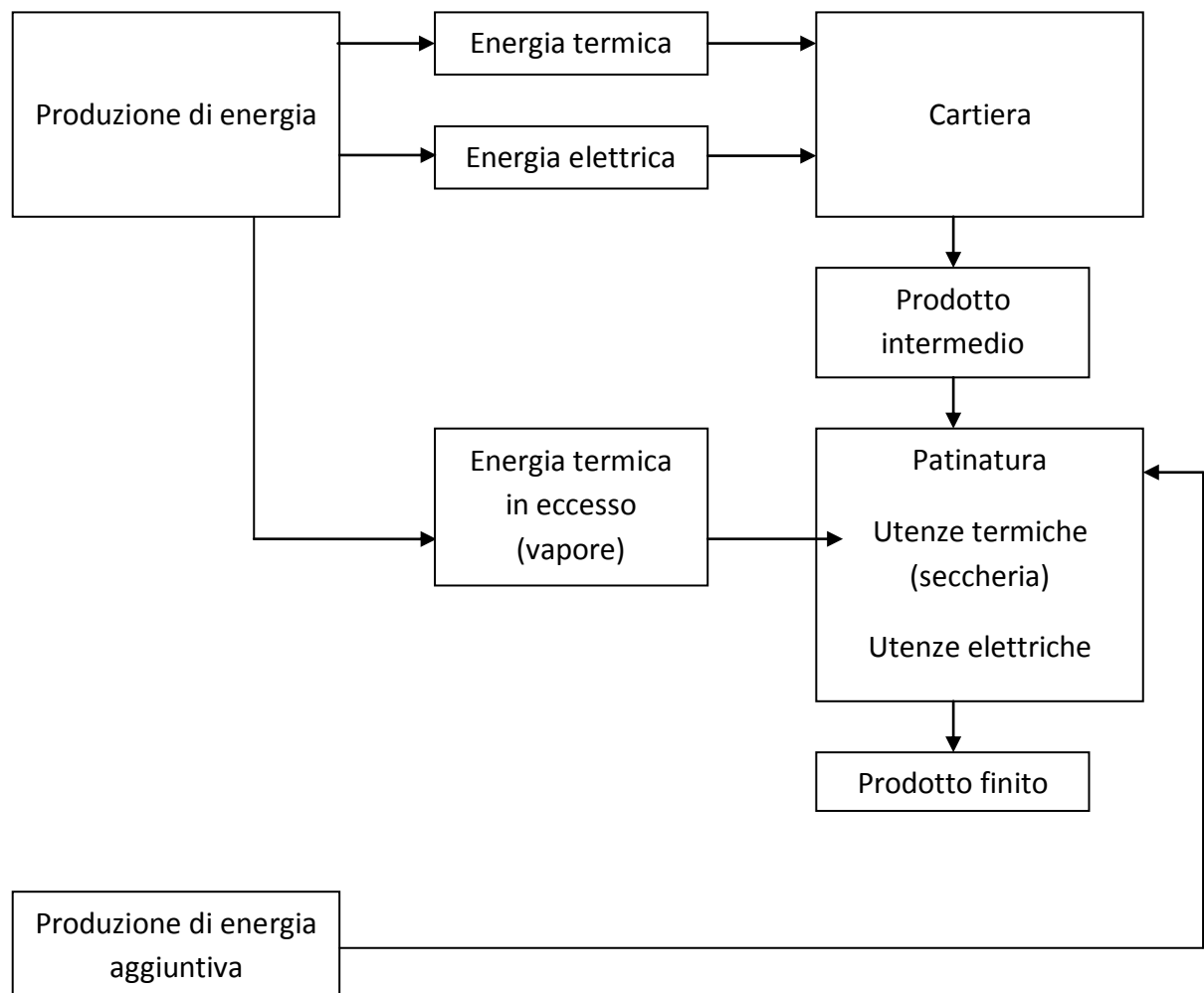
La presenza del vettore termico anche in questo caso si sposa con l'idea di affiancare una sezione di coating alla cartiera, applicabile compatibilmente con la produzione di cartone. Sfruttando la condensazione del vapore è possibile anche qui preriscaldare l'aria per le cappe:

Soluzione 2	
	Caso 1: cartone da RCF
Energia termica in eccesso prodotta (acqua ad 85°C) [t/h]	2,36
Energia utilizzabile nel processo di patinatura [kWh]	8019900

Energia termica utilizzata dal processo di patinatura [kWh/y]	18000000
Energia termica mancante [kWh/y]	9980100

Le condizioni del vapore permettono di ipotizzare anche il completamento della fase di asciugatura senza il ricorso ad elementi ausiliari (sono le stesse condizioni con cui viene effettuato l'asciugamento nella seccheria di cartiera, come abbiamo visto) impiegando cilindri essicatori. Tuttavia anche qui serve il supporto di ulteriore energia elettrica, vista la totale assenza di eccedenze sfruttabili.

Soluzione 2	
Grandezza	Caso 1: cartone da RCF
Energia elettrica in eccesso prodotta [kWh/y]	-
Energia elettrica utilizzata dal processo di patinatura [kWh/y]	750000
Energia elettrica mancante [kWh/y]	750000



Quanto visto fino ad ora consente alcune considerazioni. Ricordando l'indice introdotto nel capitolo 4:

$$i = \frac{Q + W [kWh/y]}{m_{gas} \cdot PCI_{gas} [kWh/y]}$$

definito come l'energia effettivamente consumata nei processi di cartiera diviso l'energia totale prodotta, è intuitivo notare come le integrazioni permettano di aumentare l'energia effettiva impiegata (utile al processo) a parità di combustibile immesso, e quindi di aumentare il numeratore a parità di denominatore. Tutto si traduce in un miglioramento dell'indice, ovvero in un miglior sfruttamento del combustibile (una sorta di rendimento globale), senza contare i già citati vantaggi legati al maggior valore del prodotto in uscita, riduzione dei costi di trasporto, etc. Si può valutare anche il caso in cui sia necessario un apporto aggiuntivo di energia per completare i processi della nuova configurazione.

$$i_{integrazioni} = \frac{Q + W + (Q + W)_{integrazioni} [kWh/y]}{m_{gas} \cdot PCI_{gas} [kWh/y]}$$

$$i_{integrazioni} > i$$

Soluzione	Casi 1 e 3: cartone da RCF	Caso 2: Tisue da fibra vergine	Note
4.1	$i = 0,574$ $i_{integrazioni} = 0,575$	$i = 0,6982$ $i_{integrazioni} = 0,6986$	Viene sfruttata una parte dell'energia elettrica in eccesso in entrambi i casi. Il processo integrativo non richiede altri apporti.
6.1	$i = 0,656$ $i_{integrazioni} = 0,693$	-	Viene sfruttata una parte dell'energia elettrica in eccesso. L'energia termica in eccesso viene sfruttata ma non è sufficiente, serve un apporto esterno.
2	$i = 0,662$ $i_{integrazioni} = 0,668$	-	L'energia termica in eccesso viene sfruttata ma non è sufficiente, serve un apporto esterno. Serve l'apporto esterno anche di energia elettrica.

Si osserva che anche laddove servano apporti esterni di energia, visto il basso valore di questi se confrontati con i flussi in eccesso, il valore dell'indice migliora comunque.

$$i < i_{\text{integrazioni}} = \frac{Q + W + (Q + W)_{\text{integrazioni}} [\text{kWh/y}]}{m_{\text{gas}} \cdot PCI_{\text{gas}} + (Q + W)_{\text{esterni}} [\text{kWh/y}]}$$

In realtà il miglioramento letto attraverso il confronto degli indici è molto modesto, tuttavia il fatto che nei casi specifici analizzati non si abbia un peggioramento (ossia i surplus di energia vengono sfruttati efficientemente), il fatto che si valorizzi maggiormente il prodotto in uscita, unito ai detti vantaggi legati all'accentrimento, giustifica uno studio di questo tipo.

Permangono margini di miglioramento nei casi in cui siamo in presenza di ulteriori surplus (soluzione 1, 4.1) e soprattutto nella soluzione 2 applicata ad uno stabilimento di carta tissue, dove il vapore in eccesso rimane inutilizzato. Questo fatto consente ulteriori approfondimenti. Per la stima dei consumi dei tre casi che si sono proposti, nel capitolo 4 siamo partiti facendo riferimento a dati statistici che mettono in correlazione i consumi di energia elettrica e quelli di energia termica alla quantità di carta prodotta. Richiamando il caso della produzione di carta tissue:

Tipo di cartiera	Livello indicativo di consumo energia per il calore di processo (kWh/t)	Livello indicativo di consumo energia elettrica (kWh/t)
RCF senza disinchiostrazione	1200 ÷ 1600	400 ÷ 500

Considerando l'estremo inferiore del range, si osserva che un ipotetico utilizzo totale dell'energia prodotta (inclusi gli eccessi) porterebbe il valore del consumo a superare tale limite inferiore, e per riavvicinarci a questo necessiterebbe di una quantità di carta lavorata maggiore. Ricavando questa quantità, si può quindi calcolare il valore corrispondente dell'altro tipo di energia necessaria e valutare la nuova situazione. Considerando il caso 4.1 (turbogas, generatore di vapore a recupero e postcombustore):

Soluzione 4.1	
Grandezza	Caso 1: cartone da RCF
Energia elettrica totale prodotta [kWh/y]	32760000

$$\text{Livello indicativo di consumo energia elettrica annuale [kWh/t]} = \frac{32760000 [\text{kWh}]}{50000 [\text{t}]} \\ = 655,2 \text{ kWh/t}$$

Il valore ottenuto eccede, anche se di poco, il valore obiettivo. Si ricava quindi il valore della quantità di carta che sarebbe necessaria per ottenere nuovamente tale valore.

$$m [\text{t}] = \frac{32760000 [\text{kWh}]}{400 [\text{kWh/t}]} = 81900 [\text{t}]$$

E da questo il valore corrispondente di energia termica:

$$Q [kWh] = 81900 [t] \cdot 1200 [kWh/t] = 98280000 [kWh]$$

Sottraendo a questa l'energia prevista per il caso 1 della soluzione 4.1 si ottiene quella che dovrebbe essere prodotta in più in questa nuova configurazione che lavora un maggior quantitativo di carta:

$$Q - Q_{vecchio\ caso} = (98280000 - 60000000)[kWh] = 38280000 [kWh]$$

La cui produzione richiederebbe una maggior quantità di energia in ingresso associata al combustibile. L'indice i di partenza quindi si modificherebbe:

$$i_{maggior\ produzione} = \frac{Q + W_{totale} + Q_{dovuto\ a\ maggior\ produzione} [kWh/y]}{(m_{gas} + m_{gas\ aggiuntivo}) \cdot PCI_{gas} [kWh/y]} = 0,668$$

Il valore testimonia un netto miglioramento nel caso in cui si attui una misura di questo genere, va precisato però che un aumento di produzione presenta alcuni fattori limitanti, in primis quello connesso alla velocità della macchina continua (che presenta un valore massimo) e poi quello riguardante la capacità di essiccamento della seccheria (capacità di estrarre l'acqua dalla carta con una data portata di aria circolante, limiti dei cilindri essicatori, tempi di residenza, etc.), per questo motivo sono necessari studi più specifici a riguardo.

7. Conclusioni.

Il lavoro ha analizzato i processi che avvengono all'interno di uno stabilimento cartario, con lo scopo di fornire una visione d'insieme più chiara sia dal punto di vista impiantistico che di processo, proponendo soluzioni di ottimizzazione.

Dall'analisi condotta nei primi tre capitoli, che hanno puntualizzato quello che è lo stato dell'arte dei processi del settore con particolare attenzione agli usi di energia, è emersa la complessità di un inquadramento generale dei processi di cartiera, in virtù della moltitudine dei prodotti e processi che si possono osservare.

Le differenze riguardano i differenti tipi di materia prima e delle variabili tecnologiche con cui è possibile effettuare le lavorazioni, le differenti dimensioni di stabilimento e la qualità dei prodotti finali. Tanto per capire il range, individuando come parametro identificativo quello dei consumi medi di energia per unità di prodotto, si è visto come i consumi annuali di energia elettrica per tonnellata di carta prodotta per i processi principali si attestano nell'intervallo di $350 \div 1300$ kWh/t, quelli di energia termica invece nell'intervallo di $1000 \div 2100$ kWh/t. I processi secondari che completano il lavoro dei primi (converting, packaging, coating) presentano un range di consumo elettrico medio pari a $10 \div 100$ kWh/t e termico (nel solo caso del coating) stimabile in $100 \div 400$ kWh/t.

La tipologia di energia termica utilizzata è soprattutto il calore latente ceduto da vapore saturo condensante a 2 bar per la fase di asciugamento, solo una piccola quota (20%) è costituito dal calore sensibile di fumi caldi per quelle cartiere che utilizzano cappe asciugatrici.

Per quello che riguarda lo stato dell'arte dell'impiantistica, si è fatto riferimento a tre stabilimenti rappresentativi, due dei quali per la produzione di cartone da RCF (uno a taglia minore e uno a taglia maggiore) e uno per la produzione di carta tissue da fibra vergine.

I tre casi sono stati dapprima analizzati in quella che è una configurazione base dopodiché sono state tentate delle ottimizzazioni che hanno riguardato il tentativo di individuare, per lo specifico impianto, la soluzione più efficiente per la produzione di energia elettrica e termica.

Per i tre stabilimenti modello, assunto che producano rispettivamente 50000 t di cartone da carta riciclata (caso 1), 50000 t di carta tissue (caso 2) da fibra vergine e 25000 t di cartone da carta riciclata (caso 3), il confronto tra le varie alternative impiantistiche a supporto, è avvenuto per mezzo di un indice di efficienza i , definito come il rapporto tra la somma dell'energia utile utilizzata nel processo e l'energia totale immessa con il combustibile, e si sono registrati i flussi energetici in eccesso. Nel caso 1, il passaggio da una soluzione con generazioni separate alla cogenerazione permette incrementi dell'indice di efficienza i del 24% (sfruttando una turbina a vapore a contropressione), del 26% (con turbina a spillamento di vapore), del 15% (con un turbogas associato ad un GVR). Nel caso 2 invece, l'impiego della soluzione cogenerativa con un gruppo turbogas associato ad un GVR comporta un incremento dell'indice i del 18%, con l'ulteriore aggiunta di una turbina a vapore in cascata alla soluzione precedente si ha un miglioramento del 21%. Si deduce che per ogni caso esiste una configurazione impiantistica che meglio delle altre si

adatta al sistema (dipende molto dal processo, dal prodotto di destinazione e dalla taglia dell'impianto).

In alcuni casi una ottimizzazione impiantistica da sola non è sufficiente per ottenere parametri di alto livello e quindi può essere opportuno valutare un'ottimizzazione di processo a livello più generale che inserisca in cascata processi produttivi con obiettivi diversi, ad esempio inserendo filiere secondarie come il converting, il packaging e il coating, che permettono di sfruttare i flussi in eccesso di energia derivanti dalle lavorazioni principali e conferiscono alla materia in uscita lo stato di prodotto finito.

Bibliografia:

- [1]: Assocarta, 2014. L'industria cartaria nel 2013.
- [2]: Assocarta, 2015. Linee guida per la conduzione della diagnosi energetica nel settore cartario.
- [3]: COM, 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. JRC IPTS EIPPCB.
- [4] Martorano, L., Antonelli, M., 2011. Elementi di Macchine a Fluido. Edizioni ETS.
- [5] Çengel, Y.A., 2003. Heat transfer. A practical approach. McGraw-Hill.
- [6] Martinsson, J. Energy optimization of paper drying at Munksjö Paper. Department of chemical engineering, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [7] Baumgarten, H.L., 2001. La tecnologia Cartaria. Aticelca.
- [8] http://w3.siemens.com.cn/energy/cn/zh/mechanical-drives/Documents/Industrial_Gas_Turbines_EN_2013.pdf
- [9] http://www.tonissi.com/rt_files/doc/Brochure_ETW.pdf
- [10] Baiocco, A. Il circuito di testa macchina. Corso di tecnologia per tecnici cartari 2007/2008, scuola interregionale di Tecnologia per Tecnici Cartari, Verona.
- [11] Chiotti, R. La patinatura della carta. Corso di tecnologia per tecnici cartari 1999/2000, scuola interregionale di Tecnologia per Tecnici Cartari, Verona.
- [12] Caumo, M. La raffinazione. Corso di tecnologia per tecnici cartari 2007/2008, scuola interregionale di Tecnologia per Tecnici Cartari, Verona.
- [13] Puccini, M. 2011. Studio comparativo ed ottimizzazione di filiere energetiche a partire da fonti rinnovabili. Università degli Studi di Pisa.

Si ringrazia per la preziosa collaborazione il relatore Prof. Ing. Alessandro Franco dell'Università di Pisa, il relatore e direttore generale presso Ecol Studio S.p.A. Paolo Peruzzi, l'Ing. Giovanni Cascini di Ecol Studio S.p.A., le aziende Ecol Studio S.p.A. e Lucart S.p.A.